

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Estudo da flexibilidade na procura de energia por  
armazenamento térmico em edifícios de escritório com  
modelos RC**

Elodie Prino

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

2019

## Resumo

Os edifícios representam grande parte do consumo de eletricidade, dentro dos quais os edifícios de escritório têm um peso significativo. Aliado ao grande consumo está a gestão da rede elétrica, a integração das energias renováveis e a redução das emissões de gases com efeito de estufa com impacto directo nas alterações climáticas. A gestão por parte do consumidor permite deslocar as cargas consoante a necessidade da rede elétrica, além disso, o edifício em si pode ser utilizado no armazenamento térmico, nomeadamente no arrefecimento de edifícios, a inércia térmica de um edifício pode levar à redução das horas de funcionamento do ar condicionado. Este trabalho tem como principal objetivo aplicar modelos simplificados resistência-capacitância (RC) ao estudo da flexibilidade na procura de energia (demand flexibility) através do armazenamento térmico em edifícios de escritório, utilizando medições experimentais previamente realizadas em condições de ambiente de escritório com inércia leve, média e pesada. Assim, pretende-se obter os parâmetros que representam o modelo ilustrativo das trocas térmicas nestes laboratórios. Foram testados dois modelos RC, 3R2C e 2R2C, concluindo-se que se comportam de forma muito semelhante e razoável. Respondendo aos objetivos deste trabalho, foram obtidos diversos parâmetros com a aplicação dos modelos RC. Através destes parâmetros é possível concluir que os dois modelos acompanham de forma semelhante e razoável os dados experimentais, pelo que as observações referidas de seguida se referem a ambos os modelos. As capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$ , de um modo geral, são muito próximas no laboratório leve, contudo no pesado,  $C_2$  é muito superior a  $C_1$ , como era expectável. De referir que  $R_1$  é, de um modo geral, superior a  $R_2$  e que  $R_2$  se mantém praticamente constante ao longo dos cenários, assumindo valores baixos, entre 0 e  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Por outras palavras, conclui-se que o isolamento reduz efetivamente a inércia térmica, pois  $C_2$  é muito superior no laboratório pesado. Ao comparar os valores de  $C_1$  e  $C_2$  com valores de referência, conclui-se que  $C_1$  se encontra na mesma ordem de grandeza do valor comparado, contudo  $C_2$  está abaixo da referência para o laboratório leve e assume valores muito dispersos para o laboratório pesado.

**Palavras-Chave:** Armazenamento térmico em edifícios de escritório, demand flexibility, modelos RC.

## Abstract

Buildings represent a large part of the electricity consumption and offices occupy a significant weight of this consumption. Coupled to high consumption are the electric grid management, renewable energies integration and climate change reduction. Demand side management allows to shift loads depending on electric grid needs, moreover, the building itself can be used in thermal storage, namely in buildings refrigeration, building thermal inertia can help in AC operating hours reduction. This work's aim is to apply simplified models' resistance-capacitance (RC) to the demand flexibility study through offices thermal storage, by using experimental measurements previously performed under light, medium and heavy inertial office environment conditions. Thus, it is intended to obtain the parameters that represent the illustrative model of thermal exchange in these laboratories. Two RC models were tested, 3R2C and 2R2C, and drawing the conclusion that they behave very similarly and reasonably. Several parameters were obtained with the application of RC models. From these parameters it is possible to conclude that the two models follow similarly and reasonably the experimental data, so the following observations refer to both models: capacitances  $C_1$  and  $C_2$  are generally very close in the light laboratory, but in the heavy one,  $C_2$  is much higher than  $C_1$ , as expected. It should be noted that  $R_1$  is generally greater than  $R_2$  and that  $R_2$  remains virtually constant throughout the scenarios, assuming low values between 0 and 2. In other words, it is concluded that insulation effectively reduces thermal inertia, as  $C_2$  is much higher in the heavy laboratory. Comparing  $C_1$  and  $C_2$  values with reference values, it is concluded that  $C_1$  is in the same order of magnitude as the compared value, however  $C_2$  is below the reference for the light laboratory and assumes very dispersed values for the heavy laboratory.

**Keywords:** Thermal storage in office buildings, demand flexibility, RC models.

## Índice

Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas.....	x
Agradecimentos.....	xi
Acrónimos .....	xii
Simbologia e Notações.....	xiii
1. Introdução.....	14
1.1. Enquadramento.....	14
1.2. Objectivos.....	16
1.3. Estrutura do trabalho .....	16
2. Estado da Arte .....	17
2.1. Edifícios .....	19
2.2. Cargas.....	21
2.3. Demand flexibility.....	22
2.4. Comportamento térmico de um edifício.....	25
2.5. Modelos RC.....	27
3. Método .....	28
3.1. Fases do método .....	28
3.2. Método numérico .....	28
3.3. Modelos testados .....	29
3.3.1. Modelo 1: 2R2C .....	29
3.3.1.1. Equações do modelo.....	30
3.3.2. Modelo 2: 3R2C .....	31
3.3.2.1. Equações do modelo.....	32
4. Dados.....	34
4.1. Os laboratórios .....	35
4.1.1. Níveis de mobília.....	36
4.1.2. Ganhos internos.....	37
4.1.3. Dados recolhidos .....	37
5. Resultados e Discussão .....	38
5.1. Modelo 2R2C .....	38
5.1.1. Variação de $R_1$ em função da constituição dos laboratórios.....	41
5.1.2. Comparação entre as resistências $R_1$ e $R_2$ .....	42
5.1.3. Comportamento de $C_1$ com o nível de mobília.....	43

5.1.4.	Comportamento de $C_2$ com a constituição dos laboratórios.....	44
5.1.5.	Comparar as condutâncias $C_1$ e $C_2$ .....	45
5.1.6.	Considerações sobre $q_{vent}$ .....	45
5.2.	Modelo 3R2C .....	46
5.2.1.	Comportamento de $R_1$ com a constituição dos laboratórios.....	49
5.2.2.	Comparação entre as resistências $R_1$ e $R_2$ .....	50
5.2.3.	Comportamento de $C_1$ com o nível de mobília.....	51
5.2.4.	Comportamento de $C_2$ com a constituição dos laboratórios.....	52
5.2.5.	Comparação das condutâncias $C_1$ e $C_2$ .....	53
5.2.6.	Considerações sobre $R_3$ .....	53
5.3.	Modelo 2R2C vs Modelo 3R2C .....	54
5.4.	Valores de referência.....	56
6.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	59
	Referências Bibliográficas .....	61
A.	Anexos.....	63

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Procura de energia primária total [4].	14
Figura 1.2 - Produção de energia renovável e não renovável em 2017 e 2018, em Portugal. [3].	15
Figura 2.1 –Evolução da potência instalada em Portugal [3].	17
Figura 2.2 – Satisfação do consumo em Portugal [3].	18
Figura 2.3 – Consumo de energia dos edifícios por uso final nos EUA [2].	19
Figura 2.4 – Consumo final de energia dos edifícios no mundo por uso final em 2010 [2].	20
Figura 2.5 – Exemplo da distribuição de consumo por uso final para diferentes tipos de edifícios em Espanha [4].	20
Figura 2.6 –Mix de cargas do consumidor [7].	22
Figura 2.7 – Resultados finais do estudo [15].	24
Figura 3.1 – Parte do ficheiro .csv do cenário LLA. 1ª coluna contém a temperatura média interior, 2ª coluna a temperatura exterior, a 3ª coluna os ganhos internos a t <sub>mr</sub> e na 5ª coluna “0” se a janela estava fechada (temperatura aumenta) e “1” se a janela estava aberta (temperatura decai).	29
Figura 3.2 - Modelo 2R2C de um espaço enquanto bateria térmica (BaB) [14].	29
Figura 3.3 - Modelo 3R2C de um espaço enquanto bateria térmica (BaB). Adaptado de [14].	31
Figura 4.1 – Vista aérea e lateral do edifício C1 da FCUL [4].	34
Figura 4.2 – Planta do 4º piso do edifício C1 da FCUL, onde os laboratórios estão representados a azul, os gabinetes a verde e as salas de aula a amarelo. [2]	35
Figura 4.3 – Esquema dos laboratórios. O da direita, de área superior, é de constituição leve, ao passo que o da esquerda, o menor, é de constituição pesada.	35
Figura 4.4- Esquemas ilustrativos dos cenários descritos na Tabela 4.3. A primeira imagem contém apenas os cilindros com as lâmpadas (ganhos internos), a segunda contém as estantes e as mesas, e a terceira são acrescentadas as divisórias (separadores).	36
Figura 5.1 – Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMA (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.	39
Figura 5.2 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMB (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.	40
Figura 5.3 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMB (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.	40
Figura 5.4 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPA (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.	41

Figura 5.5 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPB (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	41
Figura 5.6 – Valores de $R_1$ obtidos para todos os cenários, para o modelo 2R2C. ....	42
Figura 5.7 – Valores de $R_1$ e $R_2$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C.....	42
Figura 5.8 - Valores de $C_1$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C.	43
Figura 5.9 - Valores de $C_1$ obtidos para os cenários estudados com ganhos internos baixos ( $40 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 2R2C. ....	44
Figura 5.10 - Valores de $C_1$ obtidos para os cenários estudados com ganhos internos altos ( $60 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 2R2C. ....	44
Figura 5.11 - Valores de $C_2$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C. ....	44
Figura 5.12 – Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório leve, com o modelo 2R2C.....	45
Figura 5.13 – Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório pesado, com o modelo 2R2C.....	45
Figura 5.14 – Valores de $q_{\text{vent}}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ ) obtidos, pelo modelo 2R2C, para os cenários em que houve arrefecimento dos espaços.....	46
Figura 5.15 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMA (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	47
Figura 5.16 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMB (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	48
Figura 5.17 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMB (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	48
Figura 5.18 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPA (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	49
Figura 5.19 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPB (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	49
Figura 5.20 - Valores de $R_1$ obtidos para todos os cenários, para o modelo 3R2C. ....	50
Figura 5.21 - Valores de $R_1$ e $R_2$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C.....	50
Figura 5.22 - Valores de $C_1$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C. ....	51
Figura 5.23 - Valores de $C_1$ obtidos para os cenários estudados com ganhos internos baixos ( $40 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 3R2C. ....	52

Figura 5.24 - Valores de $C_1$ obtidos para os cenários estudados com ganhos internos altos ( $60 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 3R2C. ....	52
Figura 5.25 - Valores de $C_2$ obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C. ....	52
Figura 5.26 – Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório leve, com o modelo 3R2C.....	53
Figura 5.27 – Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório pesado, com o modelo 3R2C.....	53
Figura 5.28 - Valores de $R_3$ ( $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ) obtidos, pelo modelo 3R2C, para os cenários em que houve arrefecimento dos espaços.....	54
Figura 5.29 - Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório leve, a partir do modelo 2R2C.....	54
Figura 5.30 - Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório leve, a partir do modelo 3R2C.....	54
Figura 5.31 - Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório pesado, a partir do modelo 2R2C.....	55
Figura 5.32 - Valores das capacitâncias $C_1$ e $C_2$ obtidos para os cenários do laboratório pesado, a partir do modelo 3R2C.....	55
Figura 5.33 - Valores das resistências $R_1$ e $R_2$ obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 2R2C. ....	55
Figura 5.34 - Valores das resistências $R_1$ e $R_2$ obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 3R2C. ....	55
Figura 5.35 - Valores de $q_{\text{vent}}$ obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 2R2C. ....	56
Figura 5.36 – Valores de $R_3$ obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 3R2C.....	56
Figura 5.37 – Valores de $C_2$ obtidos pelo modelo 2R2C para todos os cenários estudados, e valores de referência para inércia leve (laboratório leve a azul) e pesada (laboratório pesado a verde). ....	57
Figura 5.38 - Valores de $C_2$ obtidos pelo modelo 3R2C para todos os cenários estudados, e valores de referência para inércia leve (laboratório leve a azul) e pesada (laboratório pesado a verde). ....	57
Figura 5.39 - Valores de $C_1$ obtidos pelo modelo 2R2C para todos os cenários estudados, e valor de referência para $C_1$ (móvel). ....	58
Figura 5.40 - Valores de $C_1$ obtidos pelo modelo 3R2C para todos os cenários estudados, e valor de referência para $C_1$ (móvel). ....	58
Figura A.1 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLA (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	63
Figura A.2 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLB (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	63
Figura A.3 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPA (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	64



Figura A.4 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPB (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	64
Figura A.5 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLA (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. (*) O laboratório não foi arrefecido .....	64
Figura A.6 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLB (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	65
Figura A.7 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMA (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	65
Figura A.8 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLA (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	66
Figura A.9 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLB (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	66
Figura A.10 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPA (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. ....	67
Figura A.11 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPB (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	67
Figura A.12 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLA (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	67
Figura A.13 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLB (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	68
Figura A.14 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMA (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.....	68

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Dias das medições de cada um dos cenários. ....	34
Tabela 4.2 - Descrição dos 12 cenários estudados, onde se fez variar a construção do laboratório, o nível de mobília e o nível de ganhos internos. ....	36
Tabela 4.3 - Níveis de mobília considerados nos cenários em estudo. ....	36
Tabela 4.4 - Densidade de potência e potência das lâmpadas para cada um dos laboratórios e cenários de ganhos internos, altos e baixos. ....	37
Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos pelo modelo 2R2C para cada um dos cenários em estudo. Os valores a vermelho não fazem sentido ser considerados para os cenários respetivos, pois observando os gráficos respetivos confirma-se que não foi medida a descida de temperatura, pelo que o ambiente não foi arrefecido. Os valores em falta não foram apresentados porque terem sido considerados outliers. ....	39
Tabela 5.2 - Parâmetros obtidos pelo modelo 3R2C para cada um dos cenários em estudo. Os valores a vermelho não fazem sentido ser considerados para os cenários respetivos, pois observando os gráficos respetivos confirma-se que não foi medida a descida de temperatura, pelo que o ambiente não foi arrefecido. Os valores em falta não foram apresentados porque foram considerados outliers.....	47
Tabela 5.3 – Valores de referência para $C_2$ segundo [22]. ....	56
Tabela 5.4 – Valor de referência para $C_1$ segundo [23].....	58

## Agradecimentos

À Professora Marta Panão por ter aceitado ser minha orientadora, por me ter orientado verdadeiramente neste trabalho, por estar sempre disponível e pela sua simpatia.

Ao Professor Guilherme Carrilho pela ajuda e esclarecimentos prestados.

Ao Nuno Mateus pela disponibilidade e ajuda ao responder a várias questões sobre as medições que utilizei neste estudo.

À Filipa por me ter acompanhado numa visita aos laboratórios.

À Marta e à Joana pela amizade incondicional, por todo o apoio, paciência e pela boa disposição.

À minha madrinha Iolanda que esteve sempre lá, que me apoiou incondicionalmente, me deu força para continuar sem desistir e não me deixou distrair no tempo.

À minha tia Eleonore pela paz interior que me ajudou a encontrar e que me tranquilizou mesmo nos momentos de mais stress, pela amizade, apoio e pela presença.

À Tânia pela grande amiga que é e à Lucília por toda a força, coragem e motivação que me transmitiu.

À Joana Pedrosa por me ter cedido alojamento (e alimentação!) nas minhas idas a Lisboa, por todo o apoio e amizade.

À minha mãe que me transmitiu os valores que me tornaram na pessoa que sou hoje, pela sua preocupação, presença e apoio incondicional.

Ao meu pai pela energia que me transmite, que mantém presente a sua garra, dedicação, bom humor e filosofia de vida, que me inspira diariamente.

Ao meu mano Licos por me perguntar quase diariamente se a tese já estava entregue, pela sua amizade e coragem e pela dedicação com que agarra a vida.

Ao meu mano Cedric pelas conversas sobre o tema deste trabalho, que o motivam e acabaram por me motivar também; pela amizade e coragem.

A tod@s aquel@s que directa ou indirectamente me ajudaram e tornaram que isto fosse possível.

A tod@s um muito obrigado.

## Acrónimos

GEE	Gases com Efeito de Estufa
RC	Resistência - Capacitância
RNT	Rede Nacional de Transporte de electricidade
PV	Energia Solar Fotovoltaica
UE	União Europeia
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
EUA	Estados Unidos da América
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ZEB	Edifícios de Balanço de Energia (quase) Zero
DSM	Gestão do lado da procura
FER	Fontes de Energia Renovável
DERs	Recursos Energéticos Distribuídos
AC	Ar Condicionado
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
XPS	Poliestireno Extrudido
LLA	Laboratório Leve, mobília Leve, ganhos internos Altos
LLB	Laboratório Leve, mobília Leve, ganhos internos Baixos
LMA	Laboratório Leve, mobília Média, ganhos internos Altos
LMB	Laboratório Leve, mobília Média, ganhos internos Baixos
LPA	Laboratório Leve, mobília Pesada, ganhos internos Altos
LPB	Laboratório Leve, mobília Pesada, ganhos internos Baixos
PLA	Laboratório Pesado, mobília Leve, ganhos internos Altos
PLB	Laboratório Pesado, mobília Leve, ganhos internos Baixos
PMA	Laboratório Pesado, mobília Média, ganhos internos Altos
PMB	Laboratório Pesado, mobília Pesada, ganhos internos Baixos
PPA	Laboratório Pesado, mobília Pesada, ganhos internos Altos
PPB	Laboratório Pesado, mobília Pesada, ganhos internos Baixos

## Simbologia e Notações

$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
$A$	Área ( $\text{m}^2$ )
$k$	Condutividade térmica ( $\text{W}/(\text{m.K})$ )
$R$	Resistência térmica ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )
$U$	Coefficiente de transmissão térmica ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
$C_1$	Capacitância ( $\text{kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ )
$C_2$	Capacitância ( $\text{kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ )
$R_1$	Resistência térmica ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )
$R_2$	Resistência térmica ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )
$R_3$	Resistência térmica ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )
$q_{\text{vent}}$	Potência de ventilação ( $\text{W.m}^{-2}$ )
$\Phi_H$	Fonte de calor (W)
$mrt$	Temperatura média radiante ( $^{\circ}\text{C}$ )

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Por forma a evitar futuras crises energéticas e enfrentar o problema das alterações climáticas, a sociedade tem de promover uma alteração substancial nos sistemas energéticos. O setor dos edifícios e, em particular, as suas necessidades de aquecimento, são claramente identificados como um dos principais aspetos a trabalhar na redução do uso global de energia. Além disso, os edifícios como produtores de energia são fundamentais para o desenvolvimento de fontes de energia renovável [1].

O paradigma energético atual preocupa o mundo inteiro, pois o consumo excessivo de combustíveis fósseis, que representa mais de 80% da energia primária mundialmente consumida (Figura 1.1), para além de não ser sustentável, polui o ambiente, nomeadamente a atmosfera, e agrava o aquecimento global com repercussões no fenómeno das alterações climáticas [2].

Deste modo, investe-se cada vez mais na procura de energia limpa. Em Portugal, a produção de energia renovável aumentou de 2017 para 2018 (Figura 1.2) e prevê-se que continue a aumentar segundo as metas e objetivos nacionais e europeus. Em 2018, 52% do consumo nacional de eletricidade teve origem renovável: 23% eólica, 23% hidroelétrica, 5% biomassa e 1,5% fotovoltaica. Segundo o relatório anual da REN de 2018, em março foi atingido o máximo histórico na produção de energia eólica em Portugal, com uma produção diária de 101 GWh; em julho foi atingido o recorde histórico na produção instantânea de energia com sistemas fotovoltaicos num valor de 437 MW [3].

Um perfil da tendência do uso mundial de energia é apresentado na Figura 1.1; o uso total de energia no mundo pode subir de 10 Gtep, em 2010, para 15 Gtep, em 2025, e para 17,2 Gtep em 2040 [4].

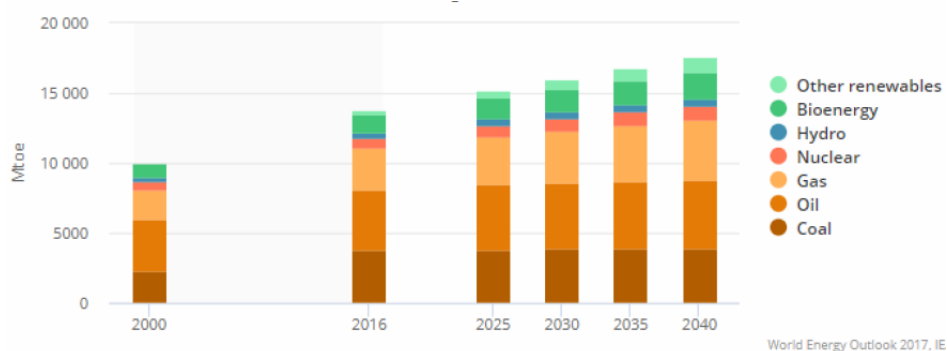


Figura 1.1 - Procura de energia primária total [4].

### Produção renovável e não renovável

[%]

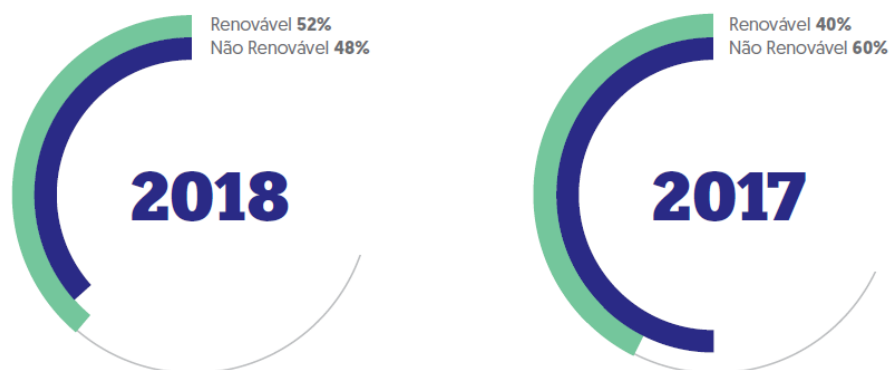


Figura 1.2 - Produção de energia renovável e não renovável em 2017 e 2018, em Portugal. [3].

Contudo, a utilização de fontes de energia renovável tem algumas desvantagens como o facto de serem incontroláveis e variáveis no tempo, tornando-se difícil prever a sua produção. Assim, por forma a evitar um desequilíbrio do balanço energético, é necessário existir uma rede elétrica mais robusta e inteligente. Neste sentido, a flexibilidade operacional pode ser aumentada através de diversas soluções, como: corte parcial da produção de energias renováveis ou o *economic load dispatch* em centrais de reserva, a gestão por parte do consumidor (*demand side management*), a *demand response* e a *demand flexibility*. O *economic load dispatch* é uma ferramenta tradicional na operação de sistemas de energia que consiste em programar a potência de saída das unidades produtoras, a fim de corresponder à procura da energia necessária a um custo operacional ideal, deste modo, o sistema energético para além de reduzir os custos operacionais, poupa energia e reduz as emissões de GEE. *Demand side management* consiste em remodelar o diagrama de carga partindo do consumo de eletricidade por parte do consumidor, reduzindo assim a diferença nos perfis de produção do sistema energético. A *demand response* promove alterações no consumo de energia elétrica através de programas e contratos baseados em incentivos, por forma a corrigir desequilíbrios. *Demand flexibility* é como que uma solução alternativa à *demand response* pois permite que os edifícios comerciais passem de consumidores passivos para ativos. Ou seja, trata-se da capacidade de um edifício reagir, aumentando ou diminuindo o seu consumo de energia, consoante exista excedente ou falta de energia na rede, sem comprometer o conforto e a atividade dos utilizadores [2].

Na Europa, os edifícios consomem em média 40% da energia final e destes, os edifícios de comércio e serviços representam 40%. Além disso, dentro dos edifícios de comércio e serviços, os edifícios para a educação e de escritório representam 40% do consumo de energia. Os edifícios no geral assumem assim um papel importante no consumo de energia, sendo uma prioridade estudar e implementar a flexibilidade do consumidor em edifícios [2].

Os edifícios para a educação e de escritório assemelham-se quer nas fontes de energia, quer na utilização e organização dos espaços, o que por vezes facilita a implementação de soluções de flexibilidade em termos energéticos. Esta flexibilidade passa pelo aumento ou diminuição do consumo energético do edifício consoante a necessidade da rede elétrica, contudo mantendo sempre o conforto do mesmo [2].

## **1.2. Objectivos**

Este trabalho pretende focar-se na importância que o armazenamento térmico de um edifício de escritórios pode ter no consumo de energia do mesmo, sem alterar as condições de conforto térmico dos espaços. Procura avaliar-se a utilização da inércia térmica do edifício como solução à intermitência das energias renováveis e aos sinais da rede elétrica (sub e sobrecarga).

Constitui um objetivo específico utilizar modelos simplificados resistência-capacitância (RC) para estudar a flexibilidade na procura de energia (demand flexibility) através do armazenamento térmico em edifícios de escritório tendo em vista a obtenção dos parâmetros físicos que representam os processos de transferência de calor.

O estudo tem por base medições experimentais realizadas no laboratório de energia em edifícios, simulando condições típicas de edifícios de escritório com inércia leve, média e pesada, levadas a cabo num período anterior a este estudo, pelo que fora do contexto da elaboração deste trabalho.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

No capítulo 2 encontra-se o estado da arte, onde é apresentada uma breve descrição dos princípios conceitos presentes neste trabalho, desde o comportamento térmico dos edifícios aos modelos RC.

No capítulo 3 é apresentado o método de trabalho usado neste estudo e são descritos os modelos testados.

No capítulo 4 é feita uma explicação dos cenários estudados, são apresentados os laboratórios onde ocorreram as medições/ cenários e são enumerados os diferentes dados recolhidos necessários à realização deste estudo.

No capítulo 5 são expostos os resultados e é feita a sua discussão.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e são propostas algumas sugestões para futuros trabalhos.



## 2. Estado da Arte

Este trabalho aborda sobretudo o consumo de energia, nomeadamente nos edifícios de escritório, contudo é importante considerar também a produção e o transporte de energia.

A rede nacional de transporte de eletricidade (RNT), no final do ano 2018, compreendia 68 subestações transformadoras, 14 postos de corte, seccionamento e transição e 8907 km de circuitos de linha [3]. A RNT conduz a energia elétrica desde os centros electroprodutores até às subestações transformadoras, onde a energia é diretamente encaminhada para o consumidor, em muito alta tensão, ou para a rede nacional de distribuição, a 60 kV [3].

As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam a evolução da potência instalada (MW) e da satisfação do consumo (TWh), respetivamente, de 2009 a 2018, em Portugal.

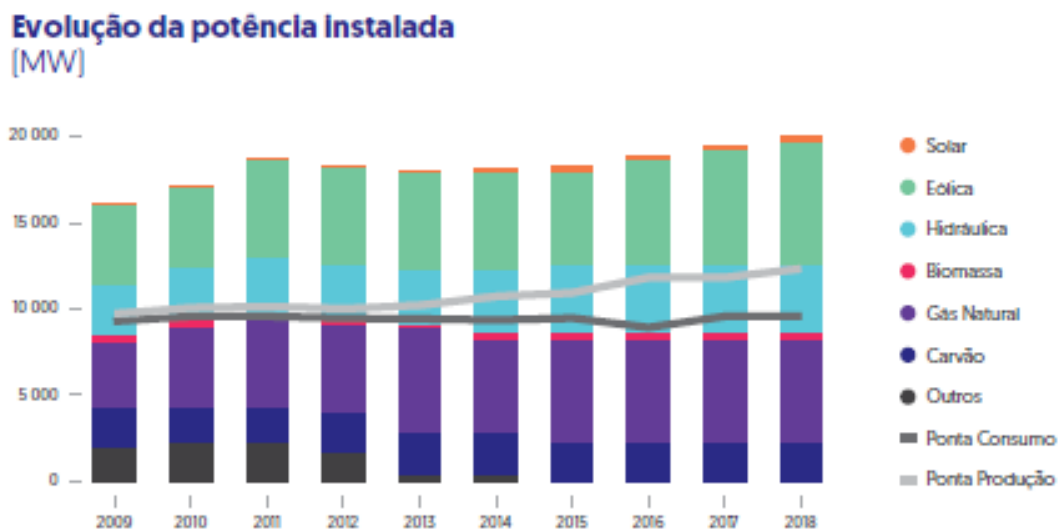


Figura 2.1 –Evolução da potência instalada em Portugal [3].

### Satisfação do consumo [TWh]

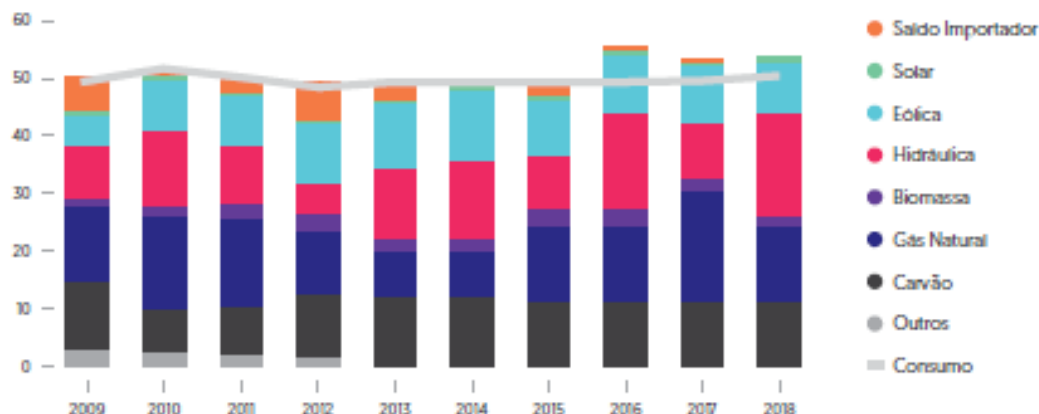


Figura 2.2 – Satisfação do consumo em Portugal [3].

Na Europa, a maioria dos edifícios residenciais e de serviços está localizada em ambientes urbanos com baixo potencial em termos de produção de energia eólica. Este potencial limitado torna a energia solar a fonte de energia renovável mais viável. Além disso, as reduções contínuas no custo do sistema fazem da energia solar fotovoltaica (PV) a tecnologia de energia renovável com um crescimento mais rápido [14].

Para que o caminho rumo à energia verde seja comum, é também importante abordar a envolvente regulamentar, pelo que relativamente à política energética europeia, no final de 2018, todas as instituições da UE assumiram o compromisso de lutar contra as alterações climáticas e por um futuro de energia limpa, de modo a formar uma Europa segura, competitiva e de baixo carbono. Este tema faz também parte das metas para 2030 e 2050, daí que tenha sido publicado no Jornal Oficial da EU três novas peças legislativas do Clean Energy Package, no final de 2018:

- A Diretiva (UE) 2018/2001, de 11 de dezembro de 2018 – referente à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis (reformulação) – estabelece para 2030 o mínimo de 32% de FER, com uma proposta de revisão (para maior quota) em 2030;
- A Diretiva (UE) 2018/2002, de 11 de dezembro de 2018 - que altera a Diretiva 2012/27/UE referente à eficiência energética – estipula uma meta vinculativa de 32,5% em 2030 e
- o Regulamento (UE) 2018/1999, de 11 de dezembro de 2018 – relativo à Governação da União da Energia e da Ação Climática –, que altera os Regulamentos (CE) n.º 663/2009 e (CE) n.º 715/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho, as Diretivas 94/22/CE, 98/70/CE, 2009/31/CE, 2009/73/CE, 2010/31/UE, 2012/27/UE e 2013/30/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, as Diretivas 2009/119/CE e (UE) 2015/652 do Conselho, e revoga o Regulamento (UE) n.º 525/2013 do Parlamento Europeu e do Conselho. Este Regulamento exigiu aos Estados-membros a apresentação até ao final de 2018 os planos nacionais integrados de energia e clima (PNEC) para o período 2021 a 2030. [3]

Relativamente à Política Energética Nacional, o governo português, durante o ano 2018, detetou oportunidades de crescimento para a economia portuguesa na transição energética e na descarbonização da economia. Assim, surgiu o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050) que contém grandes

reformulações neste âmbito para o período 2020 – 2050 nomeadamente nas áreas da produção de energia, mobilidade, transportes, edifícios e eficiência energética [3].

## 2.1. Edifícios

Em 2010, os edifícios representaram 41% da energia primária consumida nos EUA, e 7% da energia primária consumida no mundo. Destes 41%, os edifícios residenciais consumiram 54%, pelo que os edifícios comerciais consumiram os restantes 46%. Olhando agora para o consumo de eletricidade em 2010, os edifícios residenciais consumiram 29,71% e os edifícios não residenciais consumiram 29,41% na EU – 39% e 35% respetivamente nos EUA no mesmo ano [2]. Na Europa, os edifícios são responsáveis por 36% das emissões de CO<sub>2</sub> [5].

Existem diversos aspetos que distinguem os edifícios uns dos outros, nomeadamente a construção, a sua finalidade/tipo, as fontes de energia primária e final, os tipos de cargas internas e os utilizadores que vivem e/ou trabalham no edifício. A variabilidade das cargas nos edifícios é importante no que refere à potencial ajuda à rede [2].

Os edifícios não residenciais podem assumir algumas categorias, desde hospitais, escolas, escritórios, edifícios do governo, edifícios de serviços, centros comerciais, centros desportivos, hotéis, restaurantes, etc. Em 2012, nos EUA todos os edifícios de escritório, call centers, edifícios municipais e administrativos representaram 29% da área total dos edifícios não residenciais.

A Figura 2.3 mostra os diferentes usos finais da energia nos edifícios nos EUA e o seu peso no consumo total de energia, em 2010. Pode observar-se que o AVAC, que inclui o aquecimento, ventilação e ar condicionado, e o aquecimento de água perfazem mais de 60% do consumo de energia do edifício, com a iluminação a representar apenas 9% [2].

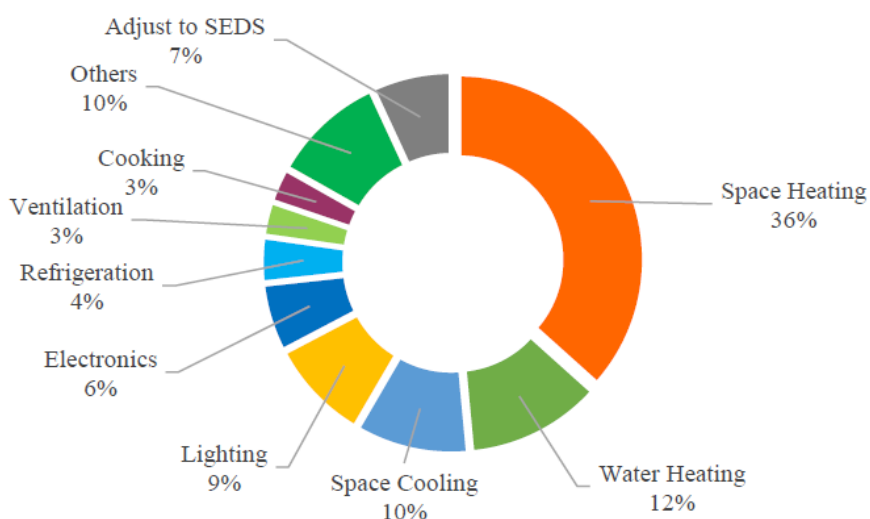


Figura 2.3 – Consumo de energia dos edifícios por uso final nos EUA [2].

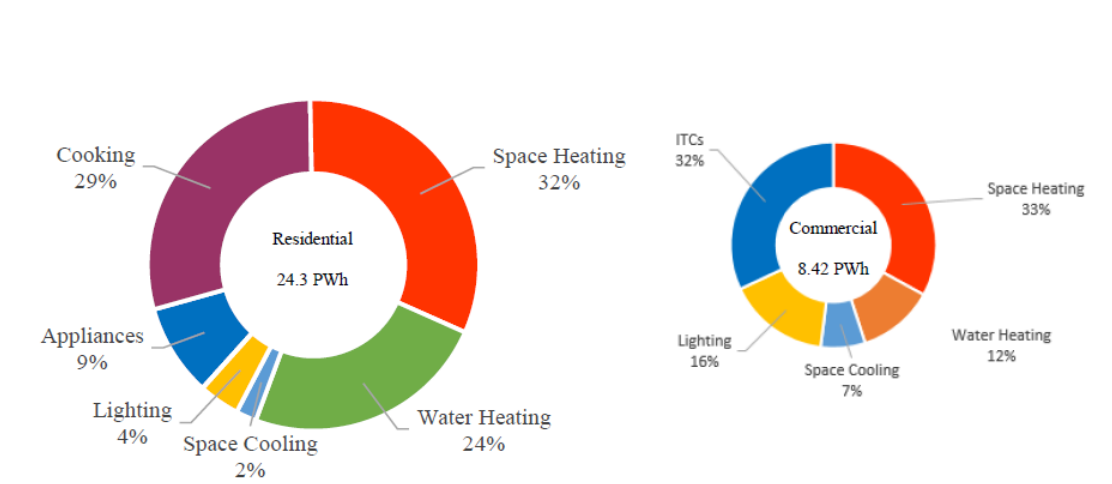


Figura 2.4 – Consumo final de energia dos edifícios no mundo por uso final em 2010 [2].

No mundo o AVAC é o maior uso final de energia no setor residencial e não residencial (Figura 2.4). Sendo o principal uso final com um peso próximo de 50%, segue-se a iluminação com 15% e os aparelhos com 10%. O tipo de edifício é fundamental na distribuição do uso final de energia (Figuras 2.4 e 2.5) e na intensidade de energia [4].

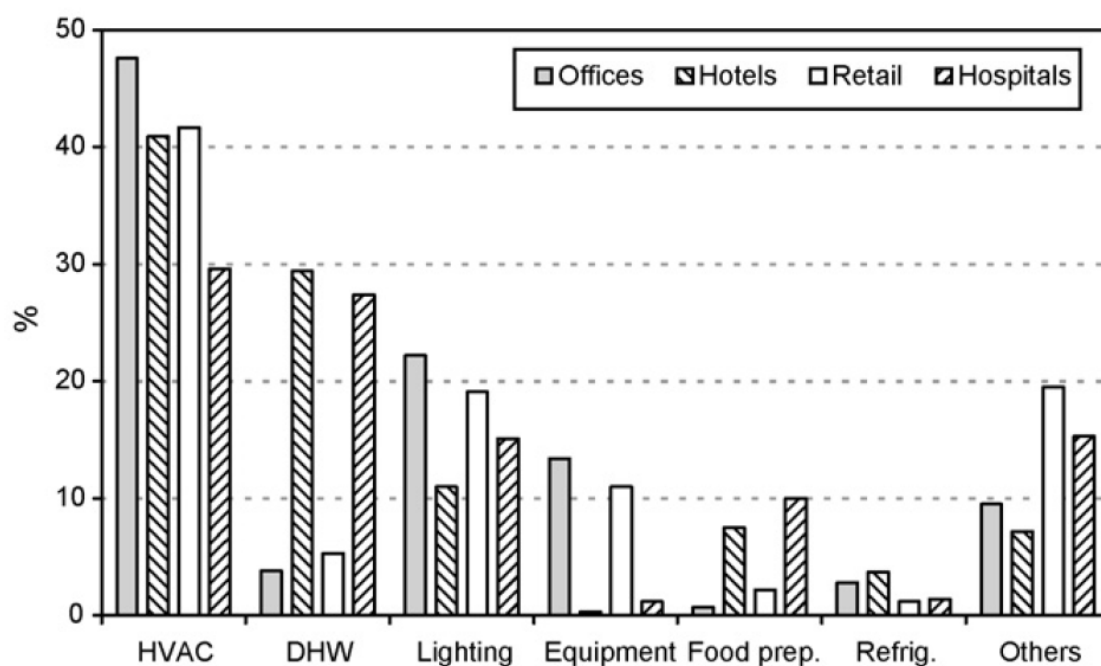


Figura 2.5 – Exemplo da distribuição de consumo por uso final para diferentes tipos de edifícios em Espanha [4].

No setor não residencial, os edifícios de escritórios são, juntamente com os comerciais, aqueles com maior consumo e emissões de CO<sub>2</sub> [4].

Em termos de consumo de energia por sector, como já foi referido anteriormente, o sector dos edifícios consome cerca de 40% da energia final total na Europa, seguindo-se o dos transportes com 33% [12]. Para alavancar um menor consumo de energia nos edifícios, estabeleceu-se o conceito de Edifícios de balanço de energia (quase) zero - Net ZEB, Net Zero Energy Building. Estes edifícios têm recebido especial atenção nos últimos anos e estão na base de diversas medidas de eficiência energética [13].

O consumo de energia de um edifício pode ser reduzido, enquanto se mantém ou melhora o nível de conforto do edifício, através de medidas de eficiência energética para edifícios. Estas podem, de uma forma geral, ser categorizadas em:

- Reduzir a necessidade de aquecimento;
- Reduzir a necessidade de refrigeração;
- Reduzir os requisitos de energia para ventilação;
- Reduzir o uso de energia para iluminação;
- Reduzir a energia usada para aquecer a água;

Reduzir o consumo de eletricidade de equipamentos e eletrodomésticos de escritório [6].

## 2.2. Cargas

Categorizar os consumidores de acordo com o seu mix de cargas ajuda a distingui-los em termos de flexibilidade da sua carga e, conseqüentemente, a avaliar a sua capacidade de resposta aos diferentes sinais da rede [7].

Na Figura 2.6 estão classificadas as cargas do consumidor (dispositivos) em cinco tipos de cargas (como é que os dispositivos são usados para fornecer os serviços) que, todas juntas, compõem o mix de cargas do consumidor. A carga do consumidor, ou seja, o consumo de energia da rede elétrica, pode primeiro ser classificada em carga armazenável e não armazenável [7].

1. Carga armazenável: carga que consegue carregar, como por exemplo um quarto, por inércia térmica, ou uma bateria termoquímica como é o caso dos carros elétricos.
2. Carga permutável: a carga é permutável se o consumidor puder trocar o período do dia em que usa a carga, sem ser afetado por esta troca, por exemplo alterar o horário de funcionamento da máquina de lavar roupa.
3. Carga interrompível: é a carga que pode ser desligada completa e instantaneamente, como é o caso das televisões.
4. Carga de base: neste caso, a carga não pode ser armazenável, permutável nem interrompível porque é uma carga central, como por exemplo o alarme de roubo, qualquer carga automática sensores de temperatura ou um elevador.
5. Por último, um dispositivo é autogerador se conseguir produzir energia como um fornecedor e armazená-la para reserva, como é o caso do solar fotovoltaico. [7]

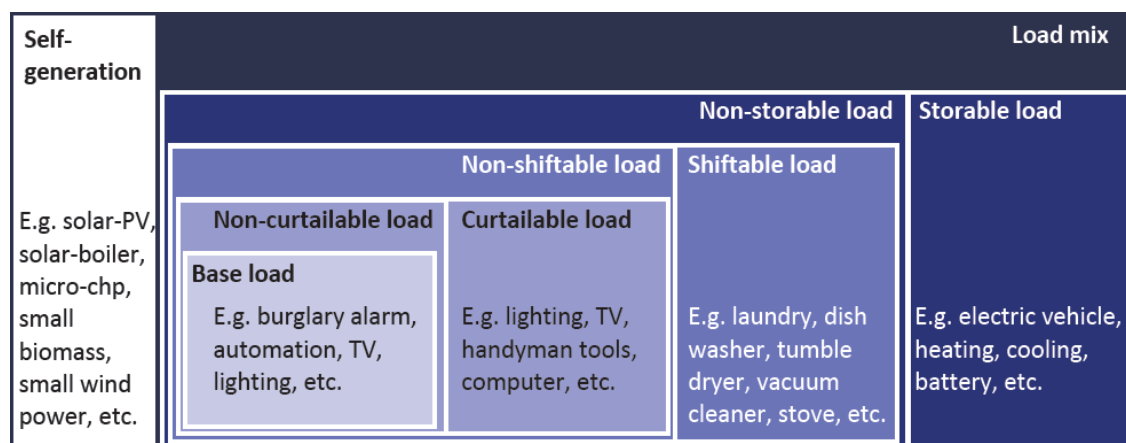


Figura 2.6 – Mix de cargas do consumidor [7].

Enquanto a oferta se torna cada vez mais incontrollável e inflexível, a solução tem passado por investir na capacidade de gerar backup. Compreender a procura, principalmente os edifícios, é um grande passo para evitar futuros desequilíbrios no sistema energético. [2]

Para as soluções que envolvem armazenamento descentralizado de energia, existem várias aplicações: armazenamento de eletricidade em baterias (por exemplo, veículos elétricos), armazenamento térmico em tanques (por exemplo, água, materiais de mudança de fase, materiais termoquímicos) ou em elementos de construção (como é o caso da inércia térmica) [14].

Os geradores elétricos, alimentados a combustíveis fósseis, são usados para compensar a procura variável da rede ou auxiliar as fontes renováveis intermitentes, contudo vão contra a independência destas fontes. A gestão do lado da procura (DSM – Demand Side Management) consiste numa abordagem alternativa que descreve o ajuste voluntário e oportuno de uma determinada carga. Este conceito pretende moldar a procura para responder à oferta atual, o que tem especial interesse no que refere à curva de produção de energia renovável. Imaginando um perfil de carga em forma de pico e vale, é possível distinguir três tipos de DSM: redução (*peak clipping*), aumento (*valley filling*) e deslocamento (*load shifting*) do consumo [8].

## 2.3. Demand flexibility

A transição energética que conduzirá a um sistema energético futuro passará pela introdução de sistemas flexíveis de energia, constituindo estes uma parte importante da solução deste problema. A flexibilidade energética de um edifício é a capacidade de gerir a sua procura e produção de acordo com as condições climáticas locais, as necessidades dos utilizadores e os requisitos da rede. A flexibilidade energética dos edifícios permitirá, assim, o controlo do lado da procura/carga e, portanto, a resposta da procura com base nos requisitos das redes circundantes e na disponibilidade de Fontes de Energia Renovável (FER), a fim de minimizar as emissões de CO<sub>2</sub>. [9] Ou seja, há uma mudança de paradigma, passando do controlo tradicional da oferta para o controlo da procura, sendo então necessário começar por estabelecer uma caracterização formal e robusta da flexibilidade energética no lado da procura [10]. Além disso, a flexibilidade energética dos edifícios desempenhará um papel importante no sistema de energia inteligente [5].

Em [11] avaliou-se o potencial da procura flexível no sistema energético futuro e, segundo este, os sistemas de energia flexíveis são essenciais para uma maior integração das fontes de energia renováveis

(flutuantes). Os resultados obtidos indicam que, para ter um impacto significativo no desempenho do sistema energético, mais de um quarto da procura clássica de eletricidade precisaria de ser flexível num mês, o que é altamente improvável; o valor da procura flexível no sistema energético é, portanto, limitado.

As estratégias para garantir a segurança e a confiança do fornecimento de energia envolvem a coordenação simultânea dos recursos energéticos distribuídos (DERs), do armazenamento de energia e da flexibilidade das cargas programáveis ligadas às redes de distribuição. Uma vez que os edifícios são responsáveis pelo consumo anual de aproximadamente 40% de energia em todo o mundo, estes podem desempenhar um papel significativo no fornecimento seguro e eficiente do futuro sistema energético [9].

Os edifícios de escritórios têm mais potencial para fornecer flexibilidade de energia à rede, em comparação com outros tipos de edifícios, devido à gestão existente de edifícios, sistemas de controlo e ao grande consumo de energia. Os consumidores de edifícios de escritórios (proprietários/gerentes e ocupantes) assumem um papel principal na adoção e no compromisso da flexibilidade energética de edifícios [5].

O potencial da flexibilidade energética no armazenamento térmico deve ser estudado usando indicadores de tempo, potência e energia. Estas propriedades estão relacionadas entre si, uma vez que a flexibilidade energética pode ser quantificada com base no tempo em que a potência e a energia se deslocam, e na quantidade de energia ou potência deslocadas. Existem outros indicadores chave como a quantificação de custos e / ou eficiência energética relacionada com a ativação da massa térmica [14].

Alguns estudos quantificam a flexibilidade de diferentes edifícios residenciais e de comércio usando os modelos EnergyPlus e Resistência-Capacitância (RC) prevendo uma capacidade inferior e superior na resposta à procura de energia [14].

Em [10] propõe-se a metodologia *Função Flexibilidade* para caracterizar a flexibilidade energética como uma função dinâmica, esta, traz novas possibilidades para permitir que os operadores da rede ou outros operadores controlem a procura através do uso de sinais de penalidade (por exemplo, preço, CO<sub>2</sub>, etc.). Por exemplo, controladores baseados em CO<sub>2</sub> podem ser usados para acelerar a transição para uma sociedade livre de combustíveis fósseis.

Em [15] avaliou-se o potencial de flexibilidade energética de edifícios de escritórios típicos, distinguidos por vários tipos de construção.

Building options	Options	Thermal comfort Class II (%)		Annual energy cost for heating and cooling (DKK/ kWh per m <sup>2</sup> )		Energy cost savings (%)	Flexibility factors
		R	F	R	F		
Case 1 (1890-1930)	Opt1	73.03	60	6.6143	7.6069	-13%	0.69667
	Opt2	78.67	61.79	6.3161	7.4792	-16%	0.75913
	Opt3	71.23	58.71	6.9718	7.8701	-11%	0.66631
	Opt4	77.3	61.19	6.5895	7.7119	-15%	0.73125
Case 2 (1940-1980)	Opt5	72.22	68.5	2.4908	1.8321	26%	0.85812
	Opt6	80.17	77.30	2.0553	1.5782	23%	0.93851
	Opt7	67.43	64.23	2.7958	2.0786	26%	0.83168
	Opt8	78.11	75.08	2.27	1.7572	23%	0.91988
Case 3 (BR 2015)	Opt9	74.23	73.67	0.89765	0.6526	27%	0.99735
	Opt10	85.08	84.01	0.47476	0.40855	14%	1
	Opt11	66.28	65.59	1.159	0.8596	26%	0.98879
	Opt12	82.73	81.58	0.64098	0.53631	16%	0.99929
Case 4 (Class 2020)	Opt13	88.11	87.86	0.3666	0.21757	41%	0.99778
	Opt14	88.37	89.19	0.21884	0.17479	20%	1
	Opt15	83.11	80.64	0.57738	0.39209	32%	0.97864
	Opt16	88.63	88	0.30601	0.23905	22%	1

Figura 2.7 – Resultados finais do estudo [15].

A Figura 2.7 sintetiza os resultados do estudo, podendo verificar-se que um sistema de aquecimento e arrefecimento de dois tubos com uma estratégia de controlo de flexibilidade baseada nos preços da eletricidade é rentável principalmente para classes de construção de energia mais altas (edifícios que cumprem a BR15 e Classe 2020). Tais edifícios, combinados com ganhos internos altos, o que normalmente ocorre em edifícios de escritórios (equipamentos, pessoas e carga de iluminação) podem contribuir para elevadas poupanças no que refere ao custo de energia para aquecimento e arrefecimento anualmente. Por outro lado, ganhos solares altos influenciam de forma negativa as estruturas sensíveis dos casos 3 e 4. Isso leva ao aumento do consumo de energia no arrefecimento, o que reduz os benefícios económicos. Os resultados das estratégias de flexibilidade aplicadas para o Caso 2 não são satisfatórios. As preocupações gerais aqui são em relação à enorme capacidade de AVAC necessária para manter o conforto requerido. Um custo elevado de investimento pode conduzir a um longo e irracional tempo de retorno [15].

É cada vez mais importante garantir o conforto não só nas habitações como também nos locais de trabalho, daí que o aquecimento do interior dos edifícios represente cerca de 75% do consumo dos edifícios na Europa [12].

Estudos indicam que as bombas de calor e o *district heating* formam as melhores soluções de fornecimento de calor, comparando custos, consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. Esta energia térmica pode ser armazenada, de forma eficiente, no ambiente interno do edifício ou em tanques de água para acumulação de calor. Assim, existem ganhos de energia que se refletem no aumento da eficiência dos edifícios [12].

Os elementos que fazem parte da mobília e que preenchem o interior dos edifícios, apresentam uma grande área de superfície para interação com o ambiente interno. Estes, trocam calor e humidade por convecção com o ar interior e por difusão com superfícies de contacto direto, como pisos ou paredes. Além disso, trocam também calor por radiação com as superfícies circundantes, influenciando o aquecimento e arrefecimento dos espaços, pois podem refletir, difundir e absorver radiação solar (ganho interno) e libertar rapidamente esta energia para o ar circundante [12].



De referir que muitas vezes se considera o facto de existir mobília um detalhe insignificante no campo da energia e dos edifícios, contudo, é diferente considerar um espaço vazio ou um espaço preenchido com diversos elementos/mobília. Tal como já foi referido, estes elementos podem ter um impacto significativo na humidade interior, assim como no conforto térmico dos espaços.

Tomando como exemplo uma sala em duas situações diferentes - numa vazia e noutra com revestimento no pavimento e móveis no interior - depois de 4 horas de aquecimento do seu interior, a sala vazia ficou 1,2 K mais quente do que a outra. No entanto, desligando a fonte de aquecimento, a sala vazia arrefece mais rápido. Contudo, para curtos períodos e baixas temperaturas, o efeito não é tão significativo [16].

Numa situação transiente, a massa térmica dum edifício pode absorver, armazenar e libertar calor progressivamente, dependendo da diferença de temperatura com o ambiente envolvente. A quantidade de calor armazenado depende da densidade  $\rho$  e da capacidade térmica mássica  $c$  do material, enquanto que a taxa de transferência de calor é influenciada pela condutividade térmica  $k$  do material. [17]

Edifícios com uma grande quantidade de massa térmica, dentro da envolvente térmica exibirão uma reação reduzida e retardada perante uma excitação inicial, como por exemplo um aumento repentino na temperatura ambiente externa. Este comportamento transitório é referido como a inércia térmica de um edifício [17].

## 2.4. Comportamento térmico de um edifício

Um sistema pode ser qualquer objeto que é estudado ou analisado, podendo ser qualquer parte de um edifício, uma sala ou um conjunto de salas, uma parte ou todo um sistema de aquecimento ou refrigeração, ou qualquer outro material em estudo. O sistema é também caracterizado pelos limites que o definem, pelo que o rodeia e pela forma como ele interage com ambos, transferindo massa e energia na forma de trabalho ou calor. Essa interação irá determinar o tipo de sistema em questão, podendo este ser aberto, fechado ou um edifício isolado [2].

Um sistema aberto pode transferir massa e energia com a sua vizinhança, um exemplo disso é uma sala com as janelas abertas, porque o ar (massa) e o calor podem ser transferidos de fora para dentro, ou vice-versa, através das paredes e janelas da sala. Um sistema fechado transfere apenas energia, como é o caso da mesma sala sem aberturas. Um sistema isolado pode ser a mesma sala com a envolvente adiabática, onde não há transferência virtual de massa nem energia dentro ou fora de seus limites [2].

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna e existem diferentes maneiras do sistema usar ou consumir essa energia. As alterações dentro do sistema são contabilizadas pela sua energia interna e representadas pela equação:

$$\Delta E_{int} = E_{int,f} - E_{int,i} = Q - W \quad (2.1)$$

A equação acima (2.1) representa a variação de energia em dado determinado intervalo de tempo, e a equação abaixo (2.2) representa a variação de energia no instante  $t$ . Ou seja, trata-se de uma taxa, uma vez que a energia (J) ao longo do tempo (s) é potência (W).

$$dE_{int} = dE_{in} - dE_{out} + dE_g \quad (2.2)$$

A variação da energia total num intervalo de 1 segundo é a taxa na qual a energia armazenada aumenta ou diminui ( $dE_{int}$ ), dependendo dos restantes termos da equação. Estes, incluem a taxa de entrada ( $dE_{int}$ ) e taxa de saída ( $dE_{out}$ ) através das fronteiras e a taxa gerada ( $dE_g$ ) dentro do sistema, como mostra a equação (2.2).

É possível fazer uma analogia para os edifícios, onde se têm ganhos e perdas de cada um dos lados da equação. Assim, no sistema – edifício - existem ganhos como ganhos internos, ganhos solares, ganhos de climatização e, em alguns casos, ganhos devido à ventilação. As perdas devem-se normalmente à transferência de calor do interior para o exterior através da envolvente. A quantidade de energia que é transferida por unidade de tempo, (W) é uma função do gradiente de temperatura,  $dT/dx$  (K/m), da área, A (m<sup>2</sup>) e da condutividade térmica,  $k$  (W/(m.K)) deste material.

A condutividade térmica diz respeito à condução de calor através de um material (2.3), que também pode ser ligada à resistência térmica R, em (2.4), que define a resistência à transferência de calor. [2]

$$q_x = -k.A.\frac{(T_s - T)}{l} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{l}{k} \quad (2.4)$$

Em [18] apresentam-se novas métricas para medir o efeito da massa térmica na energia necessária para aquecer e arrefecer edifícios. Alguns estudos falharam porque não consideraram a interação entre ocupação intermitente e massa térmica, o que tem um impacto significativo no uso geral de energia. As novas métricas desenvolvidas neste estudo são usadas para analisar o impacto da massa térmica em climas quentes com arrefecimento ativo e climas frios com aquecimento ativo. Os resultados são concordantes com a literatura existente de que estruturas com alta massa térmica provavelmente serão efetivas em climas quentes; no entanto, em climas frios, as desvantagens da alta massa térmica superam as vantagens, e a alta massa térmica pode causar um aumento do uso de energia. Essa descoberta tem implicações para o projeto de edifícios em climas frios e contradiz a suposição comum de que alta massa térmica está correlacionada com baixo consumo de energia. As novas métricas (taxa de energia transiente e valor U efetivo) são usadas aqui para analisar o desempenho dinâmico de edifícios fortemente isolados e mostrar que a alta massa térmica geralmente leva a um maior uso de energia em climas frios [18].

Os perfis diários de consumo de eletricidade dos medidores inteligentes são explorados como *proxies* do comportamento ativo em relação ao aquecimento e arrefecimento de ambientes. A influência da temperatura do ar ambiente (múltiplos limites máximos e mínimos diários) no consumo de eletricidade foi explorada numa amostra de 19 domicílios localizados no sudoeste da Europa (caracterizados por verões quentes e secos e invernos frios e húmidos), durante o ano 2014. Foram identificadas diferenças significativas no comportamento dos consumidores quanto ao padrão de consumo de eletricidade. Em [19] evidenciou-se a importância do uso generalizado de dados de medidores inteligentes no setor de edifícios cada vez mais eletrificados, para se entender como o conforto térmico pode ser alcançado através do comportamento ativo de climatização dos ocupantes. Isso é particularmente importante em regiões onde os sistemas AVAC automáticos são praticamente ausentes.

## 2.5. Modelos RC

Os modelos RC são frequentemente utilizados como aproximações simplificadas na simulação térmica de edifícios [14]. Em [20] concluiu-se que para tipologias de edifícios pouco complexas a nível construtivo e cujo objetivo seja prever as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, os modelos matriciais de base RC demonstraram ser ferramentas adequadas para prever o comportamento térmico de um edifício simplificado a uma zona térmica.

Neste âmbito, o modelo RC mais utilizado é o composto por cinco resistências e uma capacitância (conhecido como o modelo 5R1C proposto na norma EN ISO 13790) [21]. Contudo, este modelo é aplicado em casos onde o período de tempo é de vários dias. Para eventos que ocorrem num período máximo de 12h, o modelo a utilizar pode ser o 2R2C, representado no capítulo da metodologia, composto por duas resistências e duas capacitâncias [14].

O modelo 5R1C é usado por muitos países europeus como metodologia simplificada de referência para avaliar o risco de sobreaquecimento e calcular as necessidades anuais de energia dos edifícios [21]. Em [21] apresenta-se uma extensão bem-sucedida deste modelo que permite a sua aplicação na previsão da temperatura do ar interior de edifícios com dupla fachada ventilada.

### 3. Método

#### 3.1. Fases do método

Este trabalho pode ser resumido em três passos que compõem o método definido para tratar os resultados das medições experimentais nos vários espaços. De referir que o passo b) foi realizado com o apoio de um programa em código Matlab.

##### a) Teste do desempenho de vários modelos RC na simulação das condições experimentais

Perante os diversos modelos RC existentes, neste primeiro passo, é necessário perceber qual o modelo RC que descreve melhor fisicamente os fenómenos de transferência das salas monitorizadas. Ou seja, os espaços/salas onde foram feitas as medições a utilizar neste trabalho, têm dadas características que têm influência no comportamento térmico dos próprios espaços. Assim, consoante os elementos existentes, existirá um modelo RC que melhor descreve o fluxo de calor que ocorre nestas salas.

##### b) Ajuste dos parâmetros RC e análise de erro

Uma vez escolhido o modelo, pretende-se encontrar os parâmetros RC que o constituem, por correlação numérica do modelo aos dados experimentais.

##### c) Análise teórica da representatividade dos parâmetros RC obtidos

Nesta etapa, pretende-se interpretar os parâmetros obtidos de acordo com as condições deste trabalho. Isto é, tendo em conta as salas a partir das quais se fizeram as medições, é importante avaliar a adequabilidade dos parâmetros obtidos. Estudo da flexibilidade na procura de energia por armazenamento térmico em edifícios de escritório com modelos RC.

#### 3.2. Método numérico

O programa utilizado neste trabalho na obtenção dos diferentes parâmetros pretendidos foi desenvolvido em linguagem Matlab. Esse código foi previamente elaborado e testado e devolve não só os valores dos parâmetros pretendidos como também os gráficos ilustrativos dos mesmos.

Foi necessário preparar um ficheiro .csv para cada cenário com 5 colunas: a primeira contendo a temperatura média interior, a segunda a temperatura exterior, a terceira os ganhos internos, a quarta a temperatura média radiante e a quinta coluna foi preenchida com 1 ou 0 consoante o espaço estava a ser arrefecido ou não, respetivamente (abertura e fecho de janelas), como mostra a Figura 3.1.

Com estes inputs, o programa utilizado devolve os parâmetros constituintes do respetivo modelo RC (outputs):

- No método 1, modelo 2R2C: as duas resistências  $R_1$  e  $R_2$  ( $K.m^2.W^{-1}$ ), as 2 condutâncias  $C_1$  e  $C_2$  ( $kJ.K^{-1}.m^{-2}$ ) e a potência de ventilação  $q_{vent}$  ( $W/m^2$ ).
- No método 2, modelo 3R2C: as três resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  ( $K.m^2.W^{-1}$ ) e as 2 condutâncias  $C_1$  e  $C_2$  ( $kJ.K^{-1}.m^{-2}$ ).

	A	B	C	D	E	F
1	21.1173	15.0166666666667	60	21.0399413564508	0	
2	21.1438	15.0166666666667	60	21.0673380928098	0	
3	21.2053	15.0166666666667	60	21.1538398776135	0	
4	21.2936	15.0166666666667	60	21.2841726160122	0	
5	21.4118	15.0166666666667	60	21.4305150433452	0	
6	21.5465	15.0166666666667	60	21.5990464048955	0	
7	21.7084	15.0166666666667	60	21.7656922488526	0	
8	21.8806	15.0166666666667	60	21.947516573177	0	
9	22.0802	15.0166666666667	60	22.1235058643549	0	
10	22.2876	15.0166666666667	60	22.3132024477308	0	
11	22.5036	15.0166666666667	60	22.5032215706272	0	
12	22.7205	15.0166666666667	60	22.6772220805711	0	
13	22.9482	13.9341666666667	60	22.8683235594085	0	
14	23.1807	13.9341666666667	60	23.0563335033146	0	
15	23.4196	13.9341666666667	60	23.2398036715961	0	
16	23.6525	13.9341666666667	60	23.4267236104029	0	
17	23.8934	13.9341666666667	60	23.6090043345232	0	

Figura 3.1 – Parte do ficheiro .csv do cenário LLA. 1ª coluna contém a temperatura média interior, 2ª coluna a temperatura exterior, a 3ª coluna os ganhos internos a tmr e na 5ª coluna “0” se a janela estava fechada (temperatura aumenta) e “1” se a janela estava aberta (temperatura decai).

### 3.3. Modelos testados

Tendo em conta os objetivos deste trabalho e de modo a encontrar os parâmetros relativos ao armazenamento térmico mais adequados às experiências efetuadas e dados recolhidos, foram testados dois modelos RC que se descrevem de seguida.

#### 3.3.1. Modelo 1: 2R2C

A Figura 3.2 representa o modelo 2R2C, mostrando o fluxo de calor que ocorre nos laboratórios.

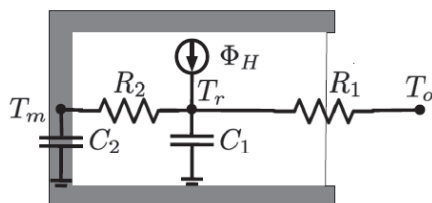


Figura 3.2 - Modelo 2R2C de um espaço enquanto bateria térmica (BaB) [14].

$C_1$  ( $\text{kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ) é a capacidade de calor (escala de tempo de vários minutos) que acumula a resposta térmica do volume de ar e de outros elementos leves na sala.

$C_2$  ( $\text{kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ) é uma capacitância maior para modelar a massa térmica ativa para o processo BaB (escala de tempo de várias horas), que engloba toda a massa interna exposta que contribui para a inércia térmica do BaB.

$R_1$  ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ ) é a resistência térmica total entre o ar ambiente da sala,  $T_r$ , e o ar no exterior ( $T_o$ ). Este termo engloba toda a troca térmica interna/externa devido à transmissão de calor e aos efeitos de ventilação.

$R_2$  ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ ) é a resistência térmica total entre o ar ambiente da sala ( $T_r$ ) e a massa térmica interna exposta ( $T_m$ ).

Falta ainda um elemento do modelo,  $\Phi_H$  (W), que caracteriza as fontes de calor que afetam  $T_r$ . Neste caso, este termo representa a potência das lâmpadas usadas para aquecer os espaços em estudo.

### 3.3.1.1. Equações do modelo

A temperatura do ar exterior é um input do modelo, pelo que são necessárias apenas duas equações para determinar os nódulos de temperatura  $T_r$  e  $T_m$ .

$$C_1 \frac{dT_r}{dt} = \Phi_H + \frac{T_o - T_r}{R_1} + \frac{T_m - T_r}{R_2} \quad (3.1)$$

$$C_2 \frac{dT_m}{dt} = \frac{T_r - T_m}{R_2} \quad (3.2)$$

Definindo  $R_{eq} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ , enquanto resistência equivalente em paralelo, as equações (3.1) e (3.2) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$R_{eq} C_1 \frac{dT_r}{dt} = R_1 R_2^* \Phi_H + R_2^* (T_o - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (3.3)$$

$$C_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m \quad (3.4)$$

Os termos  $R_{eq} C_1$  e  $R_2 C_2$  são parâmetros de tempo (em segundos),  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , respetivamente. As resistências térmicas dimensionais são  $R_1^* = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  e  $R_2^* = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Notar que  $R_2^* = 1 - R_1^*$ .

$$\tau_1 \frac{dT_r}{dt} = R_1 R_2^* \Phi_H + R_2^* (T_o - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (3.5)$$

$$\tau_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m \quad (3.6)$$

As equações que serão resolvidas numericamente com quatro parâmetros RC independentes ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $R_1$  e  $R_1^*$ ) são:

$$\tau_1 \frac{dT_r}{dt} = R_1 (1 - R_1^*) \Phi_H + (1 - R_1^*) (T_o - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (3.7)$$

$$\tau_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m \quad (3.8)$$

O método usado para resolver as equações foi o de Cranck Nicolson, resultando:

$$\left(\frac{\tau_1}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right) T_r^{t+1} - \frac{R_1^*}{2} T_m^{t+1} = \left(\frac{\tau_1}{\Delta t} - \frac{1}{2}\right) T_r^t + \frac{R_1^*}{2} T_m^t + R_1(1 - R_1^*) \Phi_H^t + (1 - R_1^*) T_o^t \quad (3.9)$$

$$-\frac{1}{2} T_r^{t+1} + \left(\frac{\tau_2}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right) T_m^{t+1} = \frac{1}{2} T_r^t + \left(\frac{\tau_2}{\Delta t} - \frac{1}{2}\right) T_m^t \quad (3.10)$$

Apresentando agora as equações no formato matriz, tem-se:

$$\theta^{t+1} = A^{-1} B \theta^t + A^{-1} S^t \quad (3.11)$$

Onde

$$\theta = \begin{bmatrix} T_r \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A = \begin{bmatrix} \tau_1^* + 0.5 & -0.5 R_1^* \\ -0.5 & \tau_2^* + 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B = \begin{bmatrix} \tau_1^* - 0.5 & 0.5 R_1^* \\ 0.5 & \tau_2^* - 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$S = \begin{bmatrix} R_1(1 - R_1^*) \Phi_H + (1 - R_1^*) \theta_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Com  $\tau_1^* = \frac{\tau_1}{\Delta t}$  e  $\tau_2^* = \frac{\tau_2}{\Delta t}$ , as constantes de tempo dimensionais.

### 3.3.2. Modelo 2: 3R2C

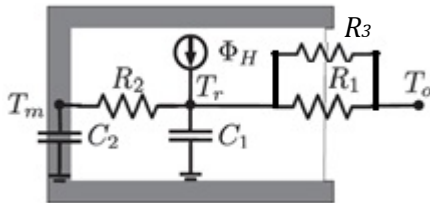


Figura 3.3 - Modelo 3R2C de um espaço enquanto bateria térmica (BaB). Adaptado de [14]

Uma vez que o modelo 1 não considera o efeito do Ar Condicionado (AC) no arrefecimento dos laboratórios, que na prática se traduziu na abertura e fecho de janelas, testou-se o modelo 2 que, como mostra a Figura 3.3, tem mais uma resistência,  $R_3$ , comparativamente ao modelo 1.

$R_3$  ( $K.m^2.W^{-1}$ ) é a resistência térmica total entre o ar ambiente da sala,  $T_r$ , e o ar no exterior ( $T_o$ ). Este termo assume um valor constante quando os laboratórios estão a ser arrefecidos (janela aberta) e infinito quando o espaço não está a ser arrefecido (janela fechada).

### 3.3.2.1. Equações do modelo

$$C_1 \frac{dT_r}{dt} = \frac{T_o - T_r}{R_1} + \frac{T_o - T_r}{R_3} + \frac{T_m - T_r}{R_2} \quad (3.16)$$

Comparativamente ao modelo 1,  $\Phi_H$  é substituído por:

$$\Phi_{int} + \frac{T_o - T_r}{R_3} \quad (3.17)$$

em que  $R_3 = \text{cte}$  (janela aberta) ou  $R_3 = \infty$  (janela fechada).

Deste modo, a matriz S difere do modelo 1, sendo agora:

$$S = \begin{bmatrix} R_1(1 - R_1^*) \Phi_{int} + \frac{T_o - T_r}{R_3} R_1(1 - R_1^*) + (1 - R_1^*)T_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Desenvolvendo a primeira linha da matriz S acima, tem-se:

$$R_1(1 - R_1^*) \Phi_{int} + \frac{T_o - T_r}{R_3} R_1(1 - R_1^*) + (1 - R_1^*)T_o = \quad (3.19)$$

$$= R_1(1 - R_1^*) \Phi_{int} + \frac{R_1}{R_3} (1 - R_1^*)T_o - \frac{R_1}{R_3} (1 - R_1^*)T_r + (1 - R_1^*)T_o \quad (3.20)$$

$$= R_1(1 - R_1^*) \Phi_{int} + \left( \frac{R_1}{R_3} + 1 \right) (1 - R_1^*)T_o - \frac{R_1}{R_3} (1 - R_1^*)T_r \quad (3.21)$$

Considerando:

$$R_1 = x_4 \quad (3.22)$$

$$1 - R_1^* = x_2 \quad (3.23)$$

$$\frac{R_1}{R_3} = x_6 \quad (3.24)$$

Tem-se:

$$x_4 x_2 \Phi_{int} + (x_6 + 1)x_2 T_o - x_6 x_2 T_r \quad (3.25)$$



Incluindo a abertura de janelas, fica:

$$x_4 x_2 q_{int}(i) + (x_6 q_{vent}(i) + 1)x_2 T_o - x_6 q_{vent}(i)x_2 T_{int} \quad (3.26)$$

## 4. Dados

Este trabalho foi realizado com base em dados de medições experimentais previamente efetuadas por alunos da FCUL em dois laboratórios, adjacentes, do piso 4 do edifício C1 da Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa (FCUL), em diversos dias entre janeiro e fevereiro de 2018, tal como indica a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dias das medições de cada um dos cenários.

Laboratório	Nível de mobília	Ganhos internos	Cenário	Dia das medições
<b>Construção Leve</b>	Leve	Baixos	LLB	24.01.2018
		Altos	LLA	23.01.2018
	Média	Baixos	LMB	22.01.2018
		Altos	LMA	15.01.2018
	Pesada	Baixos	LPB	18.01.2018
		Altos	LPA	16.01.2018
<b>Construção Pesada</b>	Leve	Baixos	PLB	22.02.2018
		Altos	PLA	21.02.2018
	Média	Baixos	PMB	31.01.2018
		Altos	PMA	01.02.2018
	Pesada	Baixos	PPB	30.01.2018
		Altos	PPA	29.01.2018

Este edifício encontra-se no Campo Grande, em Lisboa, sendo possível observá-lo de uma vista aérea e lateral na Figura 4.1, que se segue.

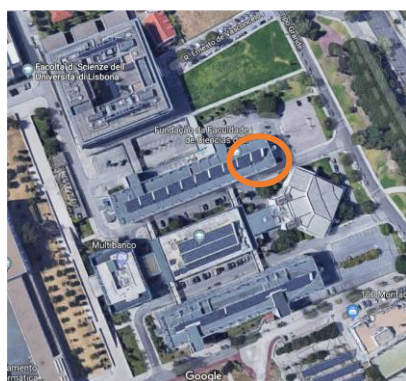


Figura 4.1 – Vista aérea e lateral do edifício C1 da FCUL [4].

O edifício em questão tem 5 pisos, compostos maioritariamente por salas de aula, laboratórios e gabinetes. Na Figura 4.2 está representada a planta do piso 4, onde os laboratórios em estudo se encontram delimitados a vermelho.



Figura 4.2 – Planta do 4º piso do edifício C1 da FCUL, onde os laboratórios estão representados a azul, os gabinetes a verde e as salas de aula a amarelo. [2]

## 4.1. Os laboratórios

Apesar de estarem situados lado a lado, com uma porta a fazer a ligação entre eles, os laboratórios diferem nas dimensões, constituição e nos elementos existentes no espaço, causadores de inércia. Os laboratórios são esquematicamente apresentados na Figura 4.3. O menor, com 21 m<sup>2</sup> de área e 3,53m de pé direito, tem uma constituição pesada, ao passo que o laboratório maior, com 37,5 m<sup>2</sup> de área e 3.23m de pé direito, tem uma constituição leve. A constituição original da envolvente de ambos os laboratórios é desconhecida, contudo, sabe-se que o de constituição leve está isolado, pelo interior, pelo que contém 10 cm de poliestireno extrudido (XPS) nas paredes exteriores e interiores, e 15 cm na cobertura e no pavimento.

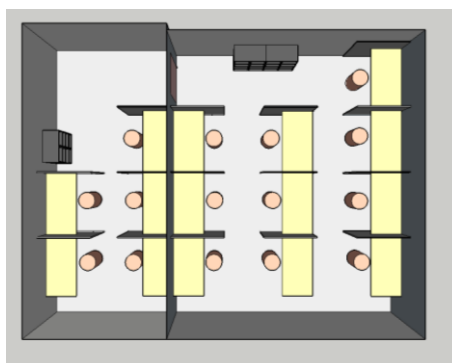


Figura 4.3 – Esquema dos laboratórios. O da direita, de área superior, é de constituição leve, ao passo que o da esquerda, o menor, é de constituição pesada.

Ao longo da experiência foram definidos diferentes cenários, nos quais a inércia térmica vai aumentando. Para cada um dos laboratórios, leve e pesado, fez-se variar o nível de mobiliário (inércia) e os ganhos internos. Na Tabela 4.2 estão representados os 12 cenários estudados.

Tabela 4.2 - Descrição dos 12 cenários estudados, onde se fez variar a construção do laboratório, o nível de mobília e o nível de ganhos internos.

Laboratório	Nível de mobília	Nível de ganhos internos	Abreviatura
<b>Leve</b>	Leve	Baixo	LLB
		Alto	LLA
	Médio	Baixo	LMA
		Alto	LMB
	Pesado	Baixo	LPB
		Alto	LPA
<b>Pesado</b>	Leve	Baixo	PLB
		Alto	PLA
	Médio	Baixo	PMB
		Alto	PMA
	Pesado	Baixo	PPB
		Alto	PPA

#### 4.1.1. Níveis de mobília

Os cenários anteriormente definidos diferem no nível de mobília, fazendo assim variar a inércia térmica para além da própria constituição dos laboratórios. Deste modo, e de acordo com a Tabela 4.3, existem três níveis de mobília: o baixo, cuja inércia é  $0 \text{ kg/m}^2$ , uma vez que os laboratórios não contêm nenhum tipo de mobília; o médio, cuja inércia é de  $12 \text{ kg/m}^2$ , causado pela presença de duas estantes com livros e mesas, e no alto, cuja inércia é de  $25 \text{ kg/m}^2$ , é acrescentado às estantes e às mesas, separadores entre as secretárias. As diferentes situações referidas, estão ilustradas, para cada um dos laboratórios, na Figura 4.4.

Tabela 4.3 - Níveis de mobília considerados nos cenários em estudo.

Cenários – Níveis de mobília		
<b>Baixo</b>	Sem mobília	$0 \text{ kg/m}^2$
<b>Médio-baixo</b>	Estantes + mesas	$12 \text{ kg/m}^2$
<b>Alto</b>	Estantes + divisórias + mesas	$25 \text{ kg/m}^2$

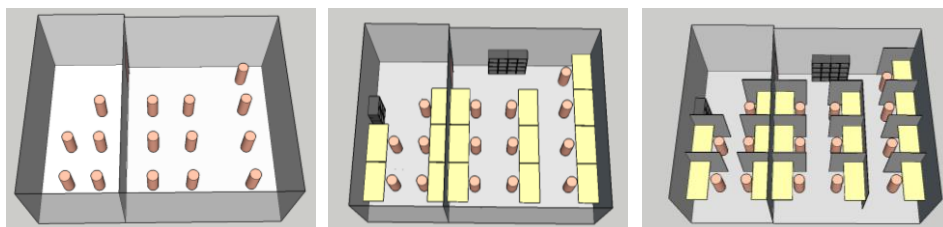


Figura 4.4- Esquemas ilustrativos dos cenários descritos na Tabela 4.3. A primeira imagem contém apenas os cilindros com as lâmpadas (ganhos internos), a segunda contém as estantes e as mesas, e na terceira são acrescentadas as divisórias (separadores).

### 4.1.2. Ganhos internos

Para cada um dos laboratórios, foram realizadas experiências com dois níveis de ganhos internos: baixo ( $40 \text{ W/m}^2$ ) e alto ( $60 \text{ W/m}^2$ ). Estes ganhos são representados nos modelos, Figuras 3.2 e 3.3, por  $\Phi_H$ .

O laboratório maior contém 10 cilindros (10 lâmpadas) e o menor apenas 5. Pelo que a potência das lâmpadas, para cada um dos laboratórios e dos cenários de ganhos internos, é a apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Densidade de potência e potência das lâmpadas para cada um dos laboratórios e cenários de ganhos internos, altos e baixos.

	Laboratório Pesado	Laboratório Leve
<b><math>40 \text{ W/m}^2</math></b>	$40 \text{ W/m}^2 \times 21 \text{ m}^2 / 5 = 168 \text{ W}$	$40 \text{ W/m}^2 \times 37.5 \text{ m}^2 / 10 = 150 \text{ W}$
<b><math>60 \text{ W/m}^2</math></b>	$60 \text{ W/m}^2 \times 21 \text{ m}^2 / 5 = 252 \text{ W}$	$60 \text{ W/m}^2 \times 37.5 \text{ m}^2 / 10 = 225 \text{ W}$

### 4.1.3. Dados recolhidos

As medições realizadas nos laboratórios, nos dias indicados na Tabela 4.1, permitiram a recolha de diversos dados, indispensáveis a este estudo. De entre os dados recolhidos, são enumerados de seguida os dados que foram utilizados neste trabalho, também apresentados na Figura 3.1. De referir que as temperaturas registadas foram medidas através de sensores localizados nos laboratórios.

- Temperatura do ar interior ( $^{\circ}\text{C}$ ) medida com um intervalo de um minuto;
- Temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ ) medida com um intervalo de 1 hora.
- Ganhos internos constantes durante cada experiência e definidos consoante o cenário de ganhos internos
- Temperatura média radiante (mrt) ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 5. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados mais relevantes obtidos através do programa utilizado. Nesta secção, pretende-se responder aos objetivos deste trabalho, no sentido de encontrar o modelo RC mais adequado para descrever o armazenamento térmico em edifícios de escritório, com base nas experiências realizadas, ou seja, nos dados experimentais utilizados na construção do modelo enquanto inputs do programa.

Neste capítulo analisa-se cada um dos cenários como também se comparam os parâmetros obtidos para os vários cenários estudados. Por fim comparam-se os dois modelos: 2R2C e 3R2C.

### 5.1. Modelo 2R2C

Tal como se pode observar na Figura 3.2, e como o próprio nome indica, o modelo 2R2C é composto por duas resistências e duas capacitâncias.

A resistência  $R_1$  representa a resistência térmica (expressa em  $K.m^2.W^{-1}$ ) da envolvente exterior, quer isto dizer que esta resistência irá aumentar com o aumento de isolamento na envolvente, uma vez que quanto maior a espessura de isolamento, menor será a transferência de calor. Deste modo, comparando os dois laboratórios, é de esperar que  $R_1$  seja superior no laboratório de constituição leve, pois este encontra-se isolado pelo interior com 10 cm de XPS. Contudo, para o mesmo laboratório,  $R_1$  não deverá alterar muito entre cada um dos cenários, pois estes variam apenas no nível de mobília e nos ganhos internos, o que em princípio não deverá afetar  $R_1$ .

A resistência  $R_2$  ( $K.m^2.W^{-1}$ ) representa a transferência de calor por convecção, ou seja, a troca de calor entre a envolvente exposta e o ar no interior dos laboratórios. Assim, é de esperar que  $R_2$ , em ordem de grandeza, seja inferior a  $R_1$ . Além disso,  $R_2$  pode ser diferente entre os dois laboratórios, mas, para o mesmo laboratório, não deverá alterar entre os diferentes cenários.

A capacitância  $C_1$  ( $kJ.K^{-1}.m^{-2}$ ) diz respeito à energia térmica armazenada na mobília e em objetos existentes no interior dos laboratórios. Assim, será de esperar que nos cenários com um nível superior de mobília, esta capacitância seja superior relativamente a cenários com pouca ou nenhuma mobília.

A capacitância  $C_2$  ( $kJ.K^{-1}.m^{-2}$ ) traduz, por sua vez, a energia térmica armazenada nas envoltentes interiores dos laboratórios, tal como se representa na Figura 3.2. Este parâmetro irá assim ajudar a perceber qual a influência do isolamento das envoltentes no armazenamento de energia, pois é esperado que no laboratório isolado se obtenham valores menores de  $C_2$  comparativamente ao laboratório não isolado.

Os ganhos internos presentes nos laboratórios em estudo, representados na Figura 3.2 pelo símbolo  $\Phi_H$  ( $W.m^{-2}$ ), são efetivamente lâmpadas que aquecem os espaços. Estes, assumem os valores de 40 ou 60  $W.m^{-2}$  consoante o cenário (ganhos internos baixos ou altos, respetivamente).

A Tabela 5.1 contém todos os parâmetros obtidos a partir do modelo 2R2C para cada um dos doze cenários. Parâmetros esses que são  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $q_{vent}$ . Os valores em falta foram considerados *outliers*,

daí não serem apresentados. Falta apenas abordar o último parâmetro referido,  $q_{vent}$ , cujos valores são uma estimativa da potência de ventilação utilizada no arrefecimento dos laboratórios.

Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos pelo modelo 2R2C para cada um dos cenários em estudo. Os valores a vermelho não fazem sentido ser considerados para os cenários respetivos, pois observando os gráficos respetivos confirma-se que não foi medida a descida de temperatura, pelo que o ambiente não foi arrefecido. Os valores em falta não foram apresentados porque terem sido considerados outliers.

Método 1 – Modelo 2R2C					
	$R_1$ (K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$R_2$ (K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$C_1$ (kJ.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	$C_2$ (kJ.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	$q_{vent}$ (W.m <sup>-2</sup> )
<b>LLA</b>	34,00	0,14	9,34	3,09	79,62
<b>LLB</b>	0,67	0,63	4,71	2,44	26,14
<b>LMA</b>	0,27	---	5,44	9,99E-09	15,07
<b>LMB</b>	29,57	0,22	9,27	78,29	41,83
<b>LPA</b>	7,92	0,19	17,76	18,80	61,93
<b>LPB</b>	64,93	0,20	15,64	8,92	62,32
<b>PLA</b>	1,50	0,06	19,21	904,57	*
<b>PLB</b>	36,54	0,06	14,80	731,54	*
<b>PMA</b>	0,29	0,83	5,11	4,26	*
<b>PMB</b>	1,57	0,09	9,84	138,16	74,05
<b>PPA</b>	0,29	0,12	13,66	52,42	90,33
<b>PPB</b>	100	0,06	13,43	156,01	88,24

(\*) Os laboratórios não foram arrefecidos

Os gráficos apresentados para cada um dos modelos, dizem respeito a alguns dos cenários estudados e apresentam as linhas resultantes das temperaturas interior (laranja) e exterior (amarelo) medidas, assim como a linha que resulta da aproximação feita pelo programa à temperatura interior (azul).

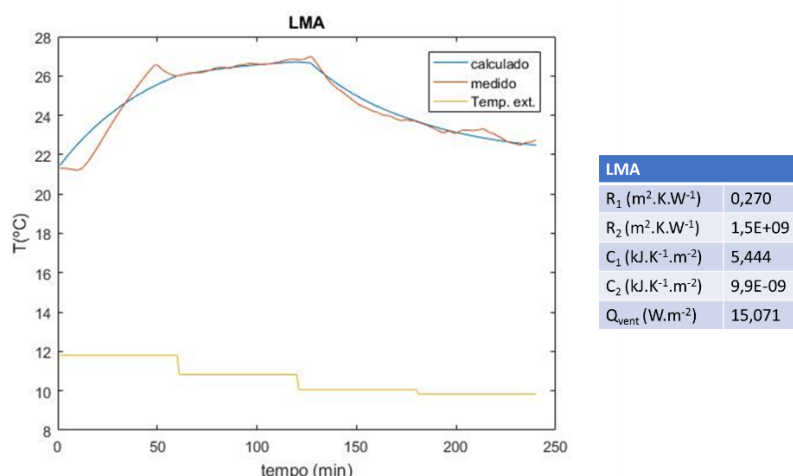


Figura 5.1 – Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMA (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

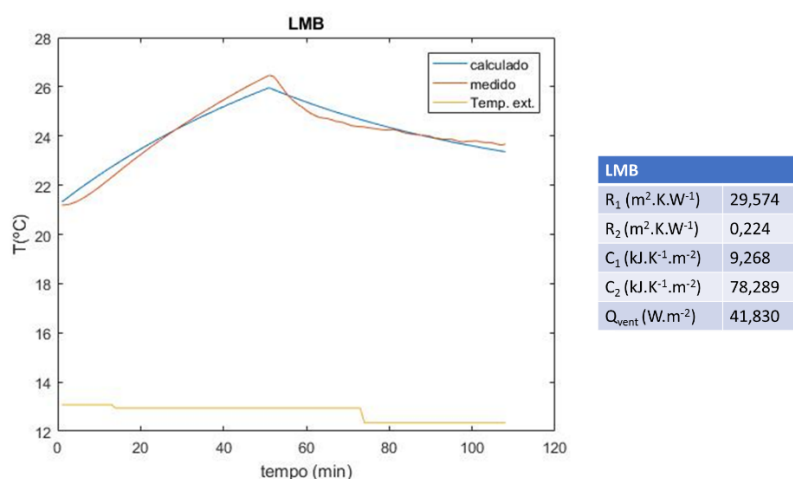


Figura 5.2 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMB (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

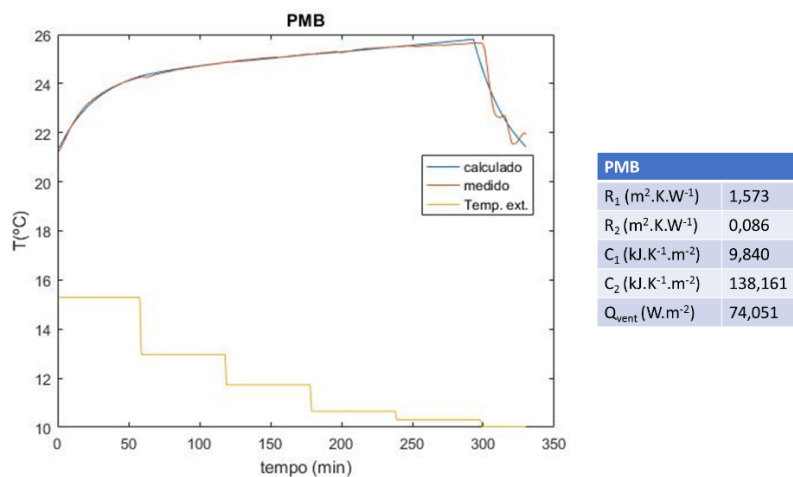


Figura 5.3 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMB (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.



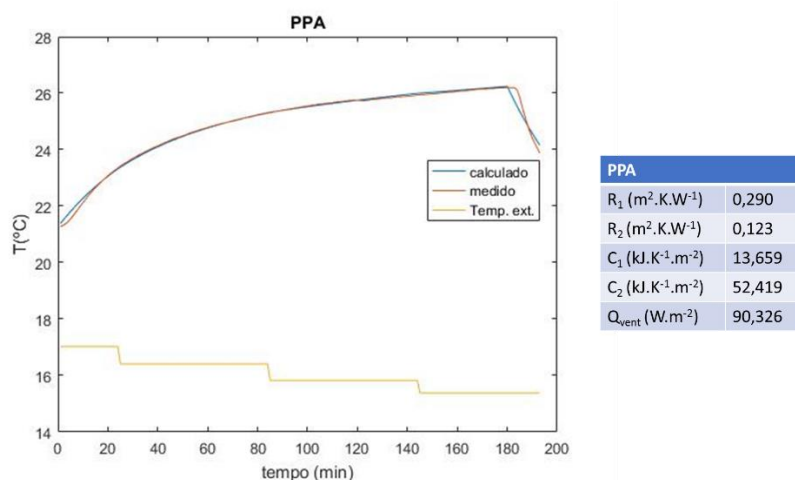


Figura 5.4 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPA (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

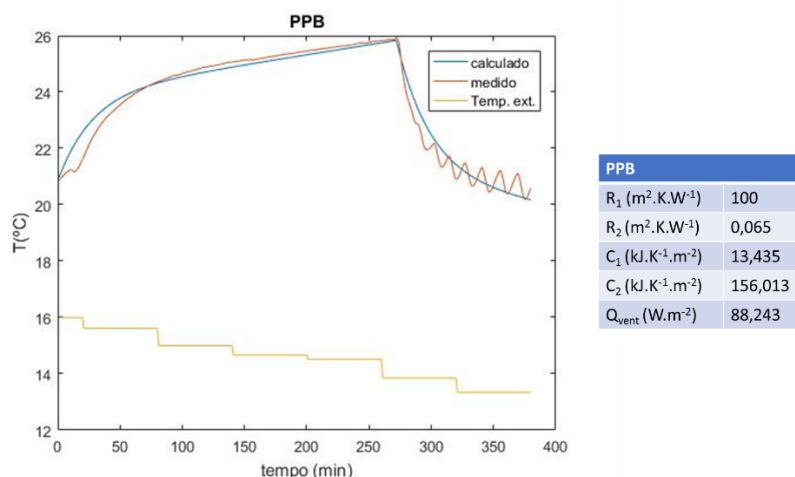


Figura 5.5 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPB (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

Os gráficos das Figuras 5.1 a 5.5 dizem respeito apenas aos cenários LMA, LMB, PMB, PPA e PPB, estando os gráficos dos restantes cenários apresentados no capítulo dos anexos. A partir dos gráficos expostos pode dizer-se que o modelo 2R2C consegue acompanhar de forma razoável os dados medidos. Consegue perceber-se que as curvas, medida e calculada, estão mais próximas nos gráficos relativos ao laboratório de composição pesada do que nos que dizem respeito ao de constituição leve. Contudo, mesmo nestes últimos, pode dizer-se que as curvas estão próximas e, como tal, que o modelo é aceitável.

### 5.1.1. Variação de $R_1$ em função da constituição dos laboratórios

Pelo esquema do modelo 2R2C, representado na Figura 3.2, observa-se que  $R_1$  é a resistência entre o exterior e o interior dos laboratórios. Assim, seria de esperar que  $R_1$  assumisse valores superiores no laboratório leve comparativamente ao laboratório pesado, pois quanto maior a espessura de isolamento, maior a resistência à transferência de calor do exterior para o interior e vice-versa, neste caso.

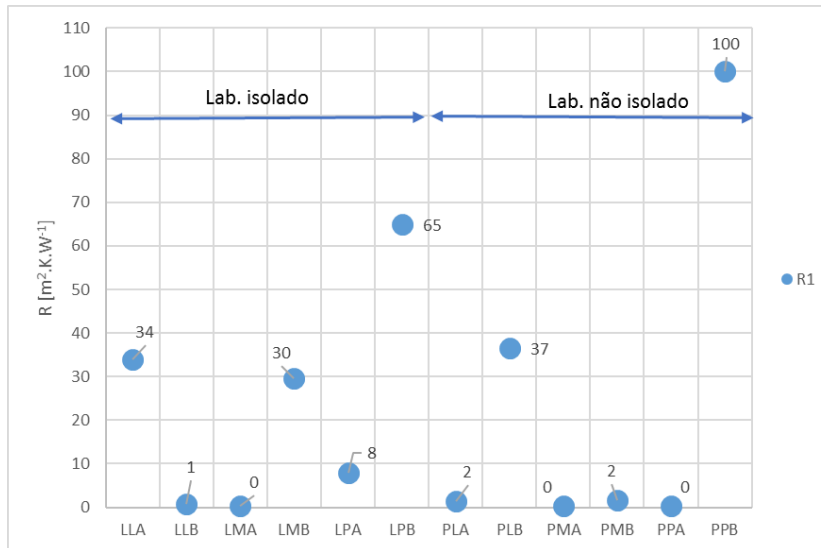


Figura 5.6 – Valores de  $R_1$  obtidos para todos os cenários, para o modelo 2R2C.

Porém, observando a Figura 5.6, conclui-se que  $R_1$  não tem o comportamento esperado, pois assume valores muito díspares em ambos os laboratórios, não havendo uma diferença visível entre os valores de  $R_1$  do laboratório leve e os do laboratório pesado. Além disso, para o mesmo laboratório, comparando apenas os seis cenários de cada laboratório entre si, este parâmetro não se mantém constante, como seria de esperar uma vez que a constituição dos laboratórios não foi alterada ao longo dos diferentes cenários.

### 5.1.2. Comparação entre as resistências $R_1$ e $R_2$

Sendo  $R_1$  a transferência por condução, entre o interior e o exterior dos laboratórios, e  $R_2$  a transferência por convecção, entre a massa e o ar no interior dos laboratórios, é de esperar que a primeira seja significativamente superior à segunda. Além disso,  $R_2$  deverá ser constante nos cenários que ocorrem no mesmo laboratório, porém, poderá ser diferente entre o laboratório leve e o pesado.

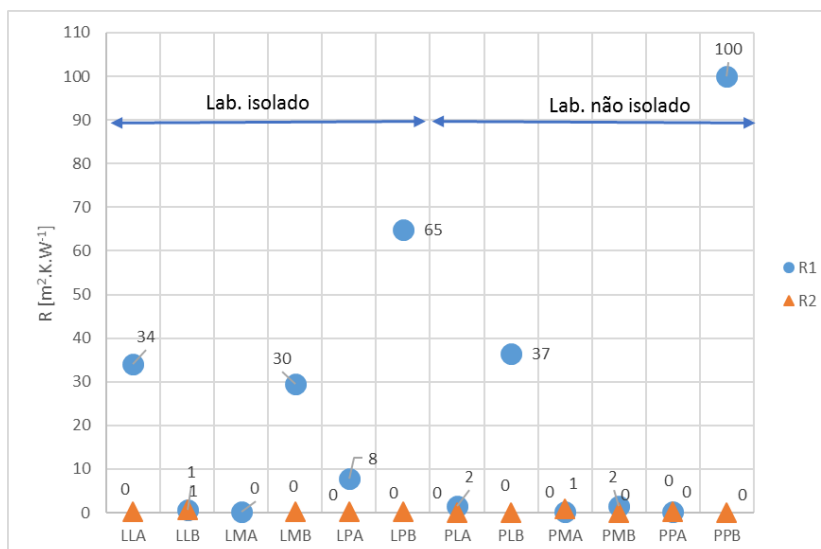


Figura 5.7 – Valores de  $R_1$  e  $R_2$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C.

Observando a Figura 5.7, acima, pode dizer-se que, de um modo geral,  $R_1$  é superior a  $R_2$ , como esperado. Pode ainda dizer-se que  $R_2$  se mantém praticamente constante, tanto para cada um dos laboratórios individualmente, como para os 12 cenários no global. Ou seja, segundo o gráfico acima,  $R_2$  não se altera com a constituição dos laboratórios. Contudo, tal como já foi referido anteriormente  $R_1$  oscila bastante ao longo dos doze cenários.

### 5.1.3. Comportamento de $C_1$ com o nível de mobília

A capacitância  $C_1$  reflete a energia térmica armazenada na mobília e restantes elementos existentes no interior dos laboratórios, ou seja, este parâmetro aumenta com a inércia térmica. Assim, é expectável que:

1.  $C_1$  aumente com o nível de mobília (do leve para o pesado);
2.  $C_1$  não se altere com a constituição do laboratório, para o mesmo nível de mobília, ou seja, que  $C_1$  em LMA =  $C_1$  em PMA, por exemplo. Pois, como mostra a Tabela 4.3, são tidos em conta três níveis de inércia térmica para ambos os laboratórios, pelo que, para o mesmo nível de mobília, o valor de  $C_1$  deverá ser o mesmo para os dois laboratórios;
3.  $C_1$  não se altere com a alteração dos ganhos internos.

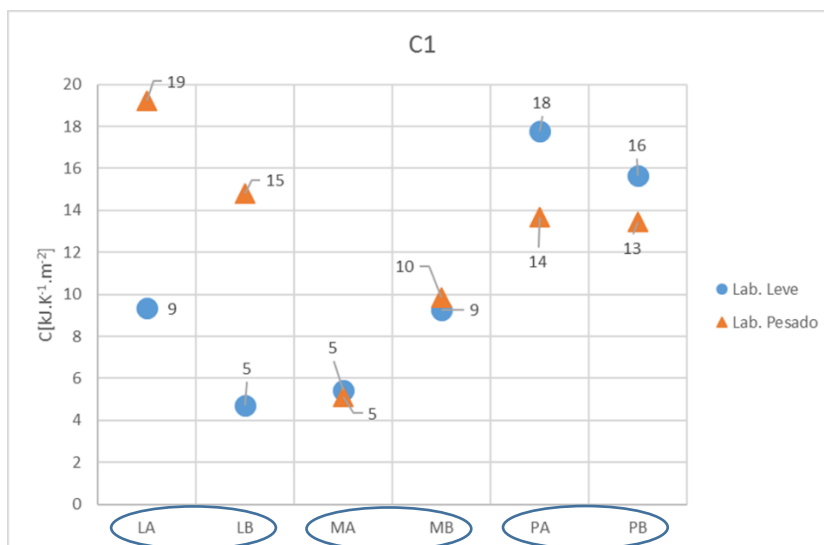


Figura 5.8 - Valores de  $C_1$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C.

Relativamente ao que seria esperado, pode dizer-se que:

1. Através da Figura 5.8 não é possível observar uma tendência clara do aumento de  $C_1$  com o nível de mobília, contudo, as Figuras 5.9 e 5.10 mostram os valores de  $C_1$  para os cenários com ganhos internos baixos e altos, respetivamente, pelos quais se observa que os valores de  $C_1$ , para o laboratório leve e ganhos internos baixos, mostram a tendência esperada. Já nos restantes casos, os valores são muito oscilantes.
2.  $C_1$  tem o mesmo valor nos cenários LMA e PMA e ainda LMB e PMB, pois tal como esperado, para o mesmo cenário, a bola azul está sobreposta ao triângulo laranja. Portanto, alterando apenas a constituição dos laboratórios, para o nível de mobília médio ( $12 \text{ kg.m}^{-2}$ ), obtém-se o mesmo valor de  $C_1$ . Já para o nível de mobília leve

(0 kg.m<sup>-2</sup>)  $C_1$  é superior no laboratório pesado, mas, para o nível de mobília pesado (25 kg.m<sup>-2</sup>), é superior no laboratório leve.

3. Tendo em conta as divisões presentes no eixo das abcissas na Figura 5.8, que agrupam os dados por níveis de mobília/ inércia térmica, incluindo ganhos internos altos e baixos, observa-se que  $C_1$  é praticamente independente dos ganhos internos apenas nos cenários com o nível de mobília pesado, onde o valor de  $C_1$  de um cenário para o outro difere apenas em 1 e 2 valores (13 e 14 kJ.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, e 16 e 18 kJ.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>).

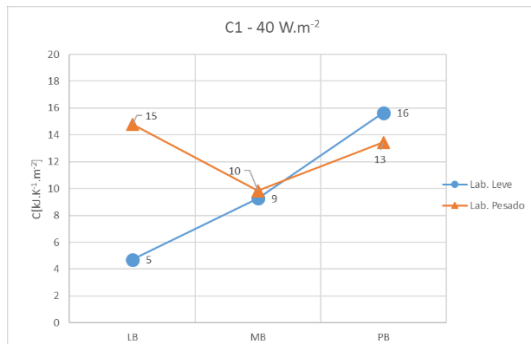


Figura 5.9 - Valores de  $C_1$  obtidos para os cenários estudados com ganhos internos baixos (40 W.m<sup>-2</sup>), de acordo com o modelo 2R2C.

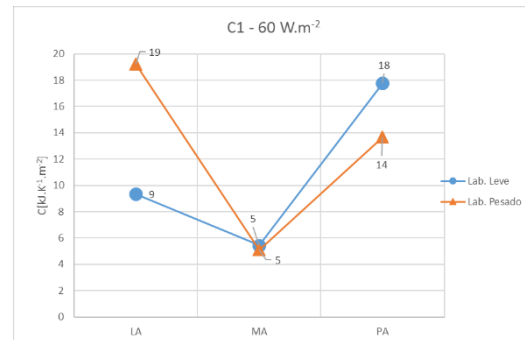


Figura 5.10 - Valores de  $C_1$  obtidos para os cenários estudados com ganhos internos altos (60 W.m<sup>-2</sup>), de acordo com o modelo 2R2C.

#### 5.1.4. Comportamento de $C_2$ com a constituição dos laboratórios

A capacitância  $C_2$  reflete a energia térmica armazenada na envolvente do laboratório, tal como está representado no esquema do modelo 2R2C a ser analisado (Figura 3.2). É expectável que este parâmetro seja superior no laboratório de constituição pesada, assumindo valores menores no laboratório de constituição leve. Além disso, estando este parâmetro dependente apenas da constituição da sala, deverá manter-se constante para cada um dos laboratórios.

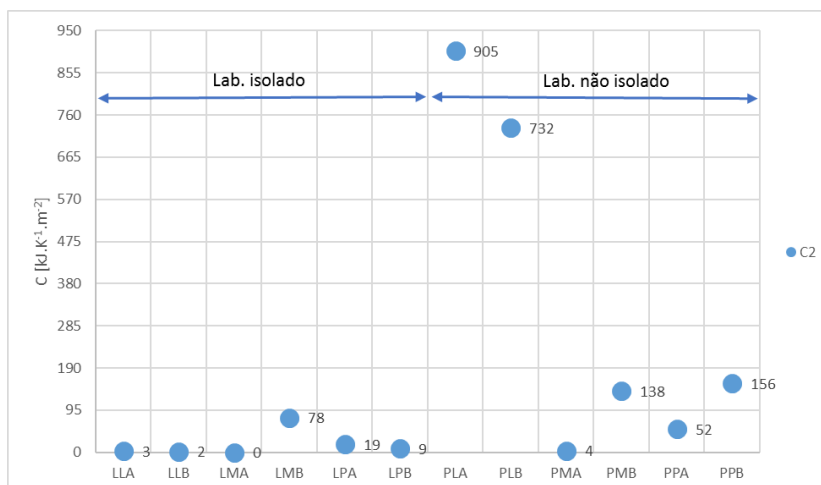


Figura 5.11 - Valores de  $C_2$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 2R2C.

A Figura 5.11 mostra a evolução de  $C_2$  ao longo dos 12 cenários estudados. Focando os valores de  $C_2$  obtidos para o laboratório leve (primeiros seis cenários), observa-se que os valores são baixos e próximos uns dos outros, à exceção do LMB (=78), que está mais distante dos restantes valores. Por outro lado, os valores de  $C_2$  para o laboratório pesado (seis últimos cenários) são significativamente superiores aos anteriores, e a gama de valores também é muito mais extensa. Desta forma, pode dizer-se que, de uma forma geral,  $C_2$  é superior no laboratório de constituição pesada e bem menor no de constituição leve, como expectável. Contudo, os valores não se mantêm constantes em nenhum dos casos, apesar de estarem bem mais próximos nos primeiros 6 cenários.

### 5.1.5. Comparar as condutâncias $C_1$ e $C_2$

Depois de analisadas separadamente poderá ser interessante comparar as duas capacitâncias,  $C_1$  e  $C_2$ . Tal como já foi referido anteriormente, as condutâncias dizem respeito à energia térmica acumulada nos diferentes materiais. Pelos esquemas das Figuras 3.2 e 3.3 pode perceber-se que a primeira se refere aos elementos existentes no interior dos espaços e à energia térmica nestes acumulada, por outro lado, a segunda depende da composição da envolvente dos laboratórios, refletindo a energia térmica armazenada nestes materiais. Deste modo, e como é possível observar nas Figuras 5.12 e 5.13,  $C_1$  não difere muito de um laboratório para o outro, uma vez que não depende da constituição destes mas dos elementos existentes nos espaços, e estes são os mesmos. Porém,  $C_2$  assume valores na mesma ordem de grandeza de  $C_1$  no laboratório leve, mas valores muito superiores no laboratório pesado.

Quer isto dizer que o laboratório leve, com 10 cm de isolamento (XPS) na constituição da sua envolvente tem uma inércia muito menor no que refere à sua constituição, tem uma condutibilidade térmica menor comparando com os materiais que constituem a envolvente do laboratório pesado, pois, sendo uma constituição pesada, a sua condutibilidade térmica é superior e, consequentemente, a sua capacidade de acumular calor também. Por este motivo é que a gama de valores de  $C_2$  é muito superior no laboratório pesado.

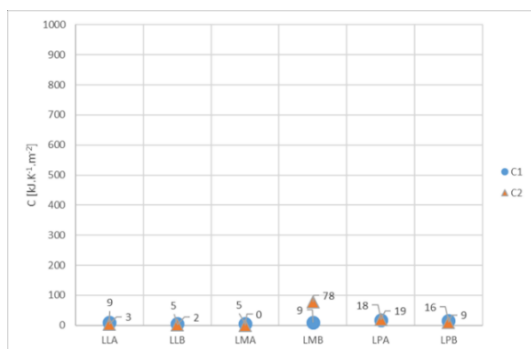


Figura 5.12 – Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório leve, com o modelo 2R2C.

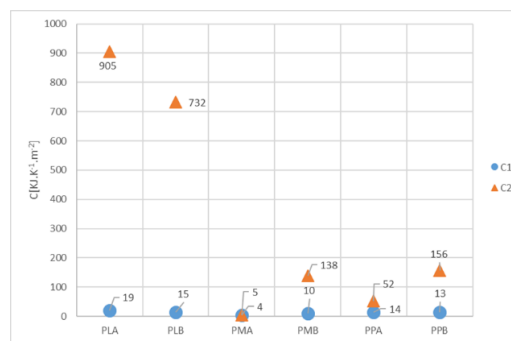


Figura 5.13 – Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório pesado, com o modelo 2R2C.

### 5.1.6. Considerações sobre $q_{vent}$

Apresentam-se agora de forma gráfica os valores de  $q_{vent}$ , que representam o arrefecimento dos espaços (laboratórios) através da abertura de janelas. Contudo, estes valores são de difícil interpretação uma vez

que não existe informação sobre o número de janelas abertas, assim como da amplitude com que estas foram abertas, porém note-se que as janelas estavam também elas isoladas pelo interior com 10 cm de XPS, no laboratório leve.

Observando a Figura 5.14 e excluindo os dois primeiros valores (cenários LLA e LLB), percebe-se que existe uma necessidade crescente de arrefecimento dos espaços, porém, sem motivo aparente.

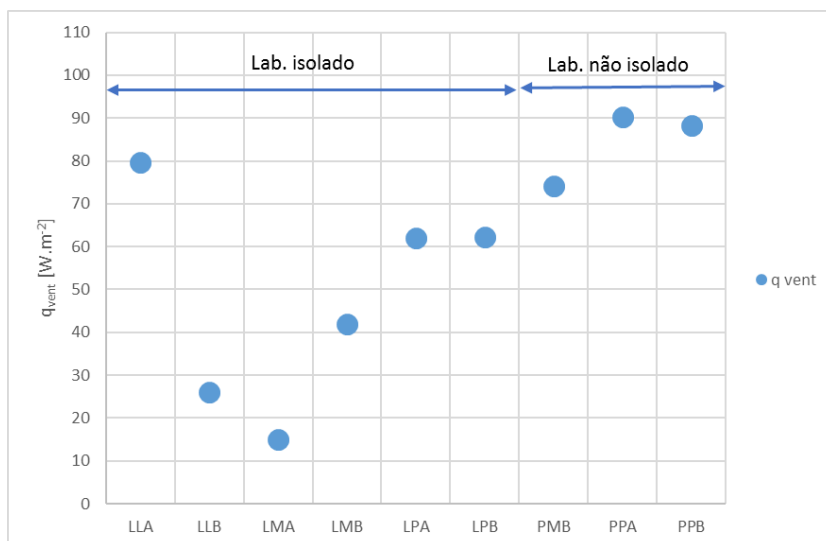


Figura 5.14 – Valores de  $q_{vent}$  (W.m<sup>-2</sup>) obtidos, pelo modelo 2R2C, para os cenários em que houve arrefecimento dos espaços.

## 5.2. Modelo 3R2C

Este modelo, tal como mostra a Figura 3.3, tem mais uma resistência comparativamente ao modelo tratado anteriormente (2R2C), pois pretende-se ter agora em conta o efeito da abertura e fecho de janelas e que este seja modelado de uma forma alternativa. Assim,  $R_3$  representa o efeito da ventilação natural, ou seja, o arrefecimento ou não do espaço. Deste modo,  $R_3$  vai ser tanto maior quanto menor o fluxo de ar a entrar nos laboratórios.

A Tabela 5.2 reúne todos os valores obtidos através do modelo 3R2C, para todos os cenários estudados. De notar que se tem agora em conta uma nova resistência,  $R_3$ , referida no parágrafo acima, que vem de certa forma substituir, com mais precisão,  $q_{vent}$ , que existia no modelo 2R2C. Os parâmetros apresentados nesta tabela são analisados, por coluna, nos subcapítulos que se seguem. De referir que o valor em falta na tabela foi retirado por ser extremamente elevado dada a gama de valores obtida para o parâmetro referente.

Tabela 5.2 - Parâmetros obtidos pelo modelo 3R2C para cada um dos cenários em estudo. Os valores a vermelho não fazem sentido ser considerados para os cenários respetivos, pois observando os gráficos respetivos confirma-se que não foi medida a descida de temperatura, pelo que o ambiente não foi arrefecido. Os valores em falta não foram apresentados porque foram considerados outliers.

Método 2 – Modelo 3R2C					
	$R_1$ (K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$R_2$ (K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$R_3$ (K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$C_1$ (kJ.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	$C_2$ (kJ.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
<b>LLA</b>	70,76	0,51	0,12	10,37	1,03
<b>LLB</b>	6,14	0,22	0,27	7,62	3,80
<b>LMA</b>	0,27	---	0,87	5,71	0,13
<b>LMB</b>	39,07	0,15	0,22	9,06	6,49
<b>LPA</b>	17,93	0,15	0,17	17,49	9,85
<b>LPB</b>	74,27	0,24	0,21	16,03	6,74
<b>PLA</b>	4,20	0,06	*	20,17	1100
<b>PLB</b>	2,70	0,07	*	13,61	577,96
<b>PMA</b>	0,29	0,83	*	5,11	4,26
<b>PMB</b>	4,87	0,08	0,17	10,98	197,73
<b>PPA</b>	2,23	0,06	0,08	18,80	230,31
<b>PPB</b>	100	0,07	0,09	16,55	181,23

(\*) Os laboratórios não foram arrefecidos

À semelhança do que acontece no capítulo anterior, apresentam-se de seguida os gráficos de alguns dos cenários estudados. Das três linhas traçadas em cada gráfico, requerem mais atenção a azul e a cor-de-laranja uma vez que o objetivo consiste em aproximar o máximo possível os dados calculados dos medidos e, portanto, a linha azul da cor-de-laranja.

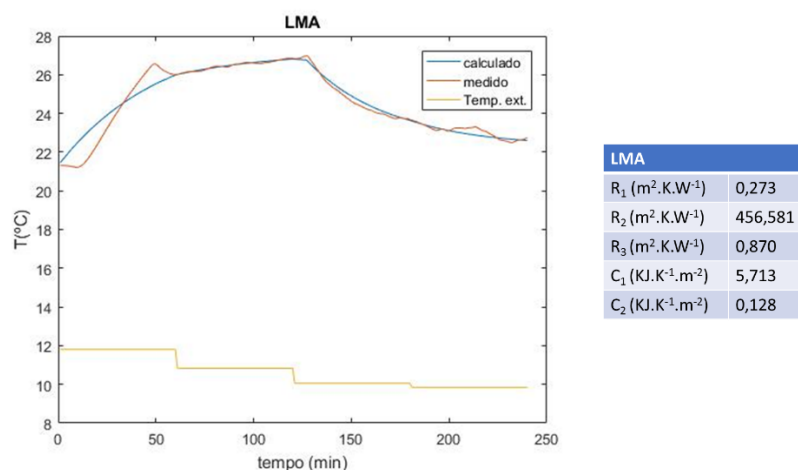


Figura 5.15 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMA (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

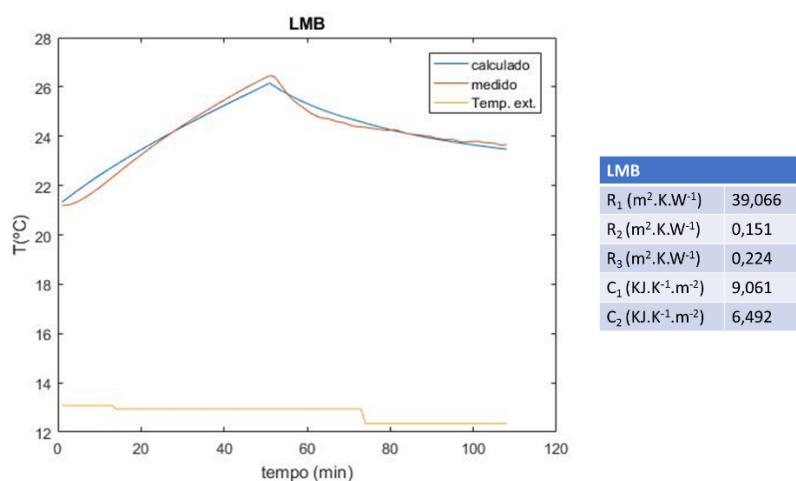


Figura 5.16 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LMB (laboratório Leve, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

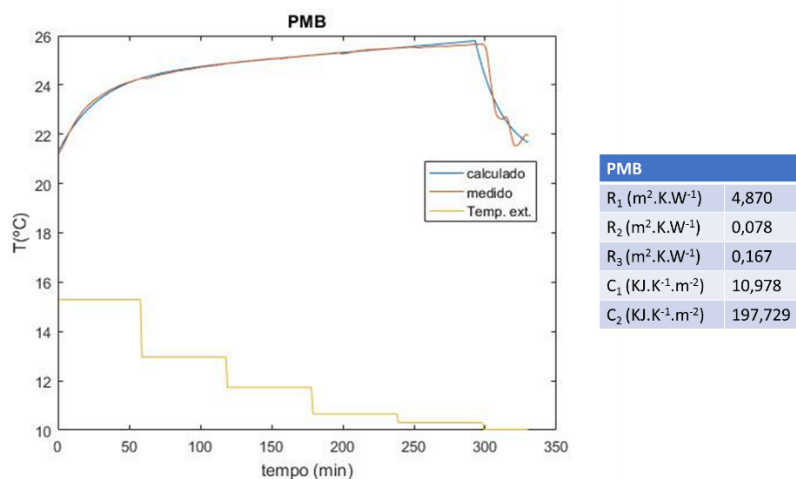


Figura 5.17 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMB (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.



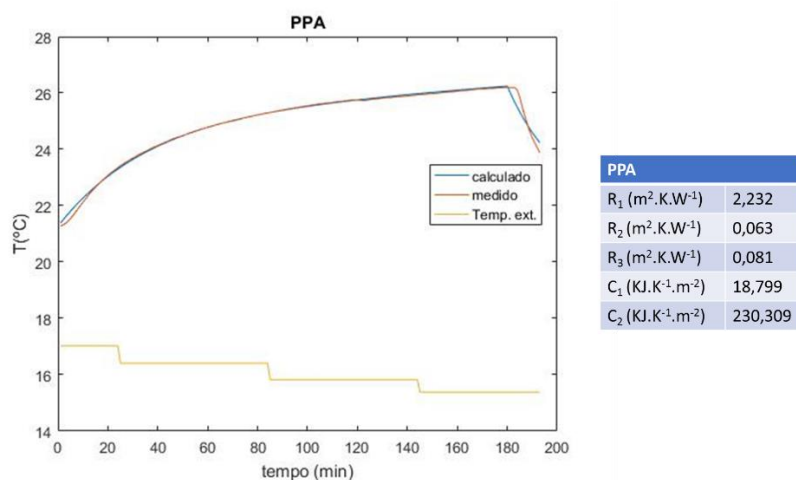


Figura 5.18 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPA (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

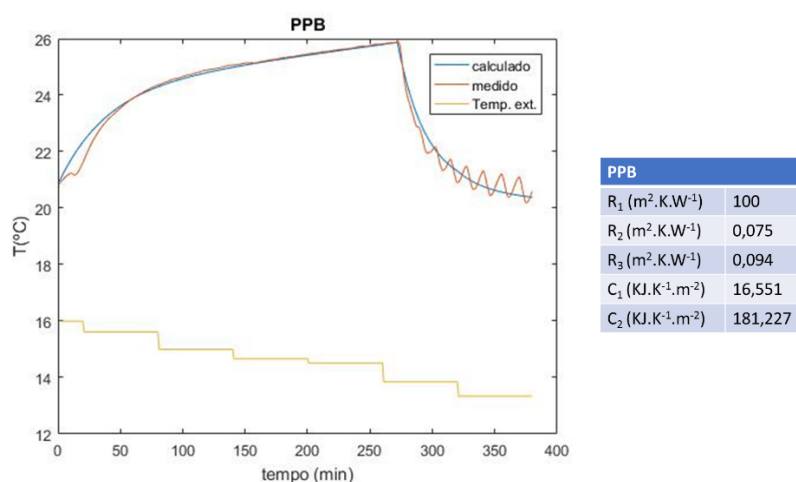


Figura 5.19 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PPB (laboratório Pesado, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

Os gráficos dos restantes cenários estão apresentados nos Anexos. Observando os gráficos das Figuras Figura 5.15 a Figura 5.19 pode dizer-se que o modelo 3R2C consegue aproximar de forma muito razoável os dados calculados aos medidos. De notar que a linha calculada suaviza as curvas, mas vai sempre ao encontro dos dados medidos.

### 5.2.1. Comportamento de $R_1$ com a constituição dos laboratórios

Tal como referido anteriormente,  $R_1$  depende apenas da constituição da envolvente exterior dos laboratórios, pelo que deverá manter-se constante ao longo dos cenários, para cada um dos laboratórios, assumindo um valor superior no laboratório isolado (leve) e inferior no laboratório pesado, não isolado.

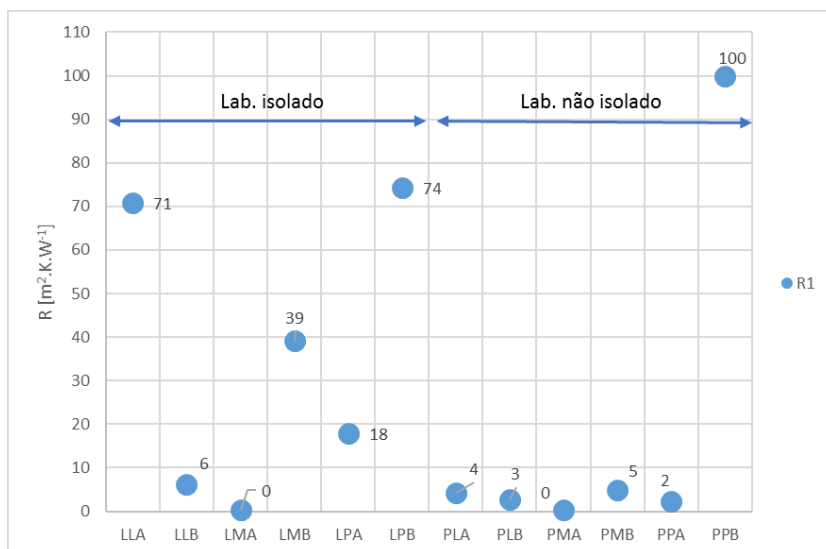


Figura 5.20 - Valores de  $R_1$  obtidos para todos os cenários, para o modelo 3R2C.

Observando a Figura 5.20, apesar da vasta gama de valores obtidos, consegue distinguir-se uma nuvem de valores reduzidos nos cenários que ocorrem no laboratório pesado, à exceção do último cenário (PPB), para o qual se obteve o valor de  $100 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ , pelo que, como previsto,  $R_1$  no laboratório pesado assume valores reduzidos. Para além disso, os valores obtidos para o laboratório leve estão longe de ser próximos, contudo são superiores aos obtidos para o laboratório pesado, como seria de esperar.

### 5.2.2. Comparação entre as resistências $R_1$ e $R_2$

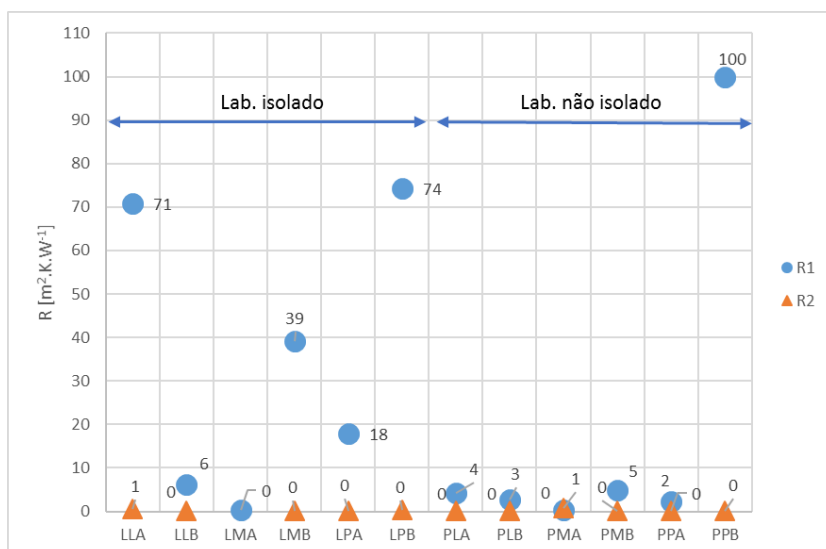


Figura 5.21 - Valores de  $R_1$  e  $R_2$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C.

Tal como seria de esperar e como se pode observar pela Figura 5.21, pode concluir-se que, no laboratório pesado, as duas resistências possuem a mesma ordem de grandeza e assumem valores muito baixo (entre 0 e 5) salvo um valor do último cenário, PPB, que está muito distante dos restantes valores. Por outro lado, olhando agora para os valores obtidos para o laboratório leve,  $R_2$  mantém-se entre 0 e 1, como acontece nos restantes cenários, e  $R_1$  encontra-se numa ordem de grandeza superior, embora assumindo

valores mais dispersos. Este facto vai ao encontro do esperado, pois no laboratório leve, o isolamento faz com que  $R_1$  seja elevada, já no laboratório de constituição pesada, esta resistência é muito menor. Relativamente a  $R_2$ , esta não difere ao longo dos doze cenários.

### 5.2.3. Comportamento de $C_1$ com o nível de mobília

A capacitância  $C_1$  reflete a energia térmica armazenada na mobília e restantes elementos existentes no interior dos laboratórios, ou seja, este parâmetro aumenta com a inércia térmica. Assim, é expectável que:

1.  $C_1$  aumente com o nível de mobília (do leve para o pesado);
2.  $C_1$  não se altere com a constituição do laboratório, para o mesmo nível de mobília, ou seja, que  $C_1$  em LMA =  $C_1$  em PMA, por exemplo. Pois, como mostra a Tabela 4.3, são tidos em conta três níveis de inércia térmica para ambos os laboratórios, pelo que, para o mesmo nível de mobília, o valor de  $C_1$  deverá ser o mesmo para os dois laboratórios, isto é, a bola azul deverá está sobreposta com o triângulo laranja para cada coluna;
3.  $C_1$  não se altere com a alteração dos ganhos internos.

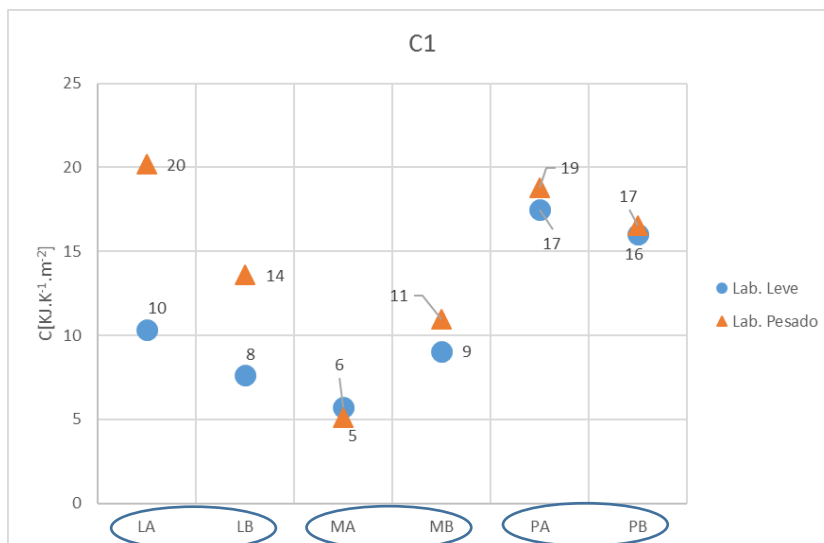


Figura 5.22 - Valores de  $C_1$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C.

Relativamente ao que seria de esperar, pode dizer-se que:

4. Através da Figura 5.22 não é possível observar a tendência esperada em todos os cenários, todavia é notável o aumento de  $C_1$  dos cenários com inércia média para os cenários com inércia pesada. Além disso, as Figuras 5.23 e 5.24 mostram os valores de  $C_1$  para os cenários com ganhos internos baixos e altos, respetivamente. Pela Figura 5.23 observa-se que os valores de  $C_1$ , para o laboratório leve e ganhos internos baixos, mostram a tendência esperada, uma vez que  $C_1$  cresce com a inércia; já nos restantes casos os valores oscilam consideravelmente.
5. Analisando o gráfico da Figura 5.22, por colunas, observa-se que apenas nos dois primeiros cenários, cuja inércia é leve, os valores estão mais distantes, pois, nos restantes cenários, os

valores estão muito próximos ou praticamente sobrepostos, para o mesmo nível de inércia, com esperado.

6. Tendo em conta as divisões presentes no eixo das abcissas na Figura 5.22, que agrupam os dados por níveis de mobília/ inércia térmica, incluindo ganhos internos altos e baixos, não é possível concluir nada acerca da influência dos ganhos internos no valor de  $C_1$ , pois apenas para o nível de inércia pesado é que os valores estão muito próximos, como expectável.

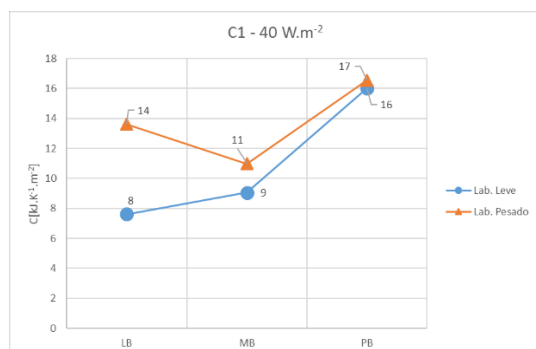


Figura 5.23 - Valores de  $C_1$  obtidos para os cenários estudados com ganhos internos baixos ( $40 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 3R2C.

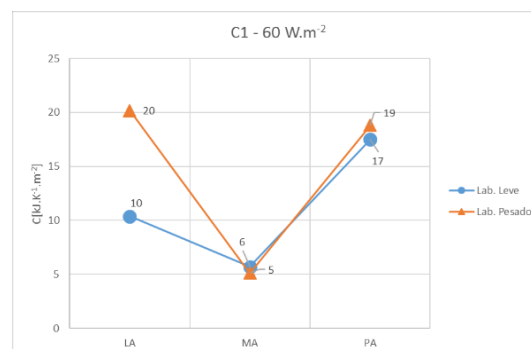


Figura 5.24 - Valores de  $C_1$  obtidos para os cenários estudados com ganhos internos altos ( $60 \text{ W.m}^{-2}$ ), de acordo com o modelo 3R2C.

## 5.2.4. Comportamento de $C_2$ com a constituição dos laboratórios

A capacitância  $C_2$  reflete a energia térmica armazenada na envolvente do laboratório, tal como está representado no esquema do modelo 3R2C a ser analisado (Figura 3.3). É expectável que este parâmetro seja superior no laboratório de constituição pesada, assumindo valores menores no laboratório de constituição leve. Além disso, estando este parâmetro dependente apenas da constituição da sala, deverá manter-se constante para cada um dos laboratórios.

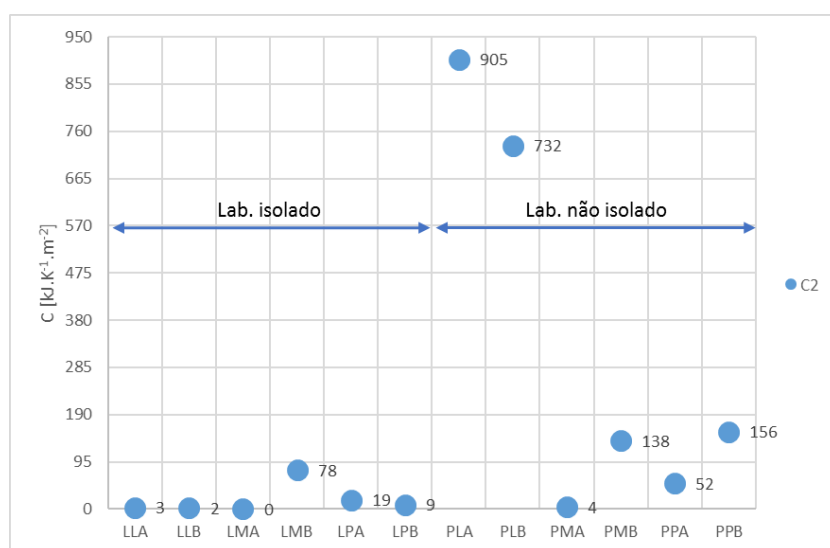


Figura 5.25 - Valores de  $C_2$  obtidos para todos os cenários estudados, de acordo com o modelo 3R2C.

A Figura 5.25 mostra a evolução de  $C_2$  ao longo dos 12 cenários estudados. Observa-se que, de um modo geral,  $C_2$  é muito menor no laboratório leve que no pesado, tal como esperado. Todavia, a gama de valores obtidos para o laboratório leve é muito menor, pelo que estes se mantêm muito mais próximos, embora não constantes, do que os valores obtidos para o laboratório pesado que oscilam de forma muito significativa.

### 5.2.5. Comparação das condutâncias $C_1$ e $C_2$

Comparando agora as capacitâncias,  $C_1$  e  $C_2$ , tal como já foi referido anteriormente, a primeira refere-se aos elementos existentes no interior dos espaços e à energia térmica nestes acumulada e a segunda depende da composição da envolvente dos laboratórios, refletindo a energia térmica armazenada nestes materiais. Assim, e como é possível observar nas Figuras Figura 5.26 e Figura 5.27,  $C_1$  não difere muito de um laboratório para o outro, uma vez que não depende da constituição dos mesmos, mas dos elementos existentes nos espaços, e estes são os mesmos. Porém,  $C_2$  assume valores na mesma ordem de grandeza de  $C_1$  no laboratório leve, mas valores muito superiores no laboratório pesado, tal como acontece no modelo 2R2C.

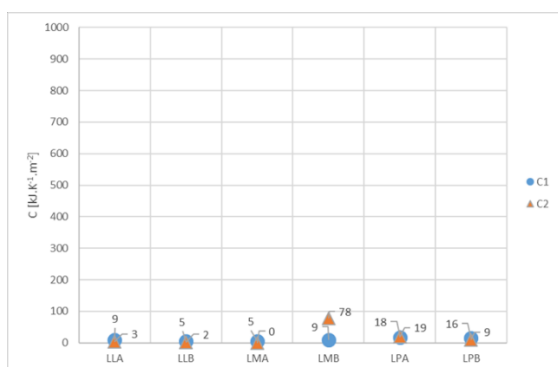


Figura 5.26 – Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório leve, com o modelo 3R2C.

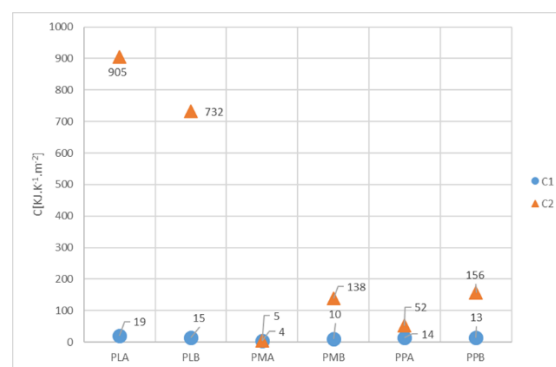


Figura 5.27 – Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório pesado, com o modelo 3R2C.

### 5.2.6. Considerações sobre $R_3$

Apresentam-se agora de forma gráfica os valores de  $R_3$ , que representam o arrefecimento dos espaços (laboratórios) através da abertura de janelas. Contudo, estes valores são de difícil interpretação uma vez que não existe informação sobre o número de janelas abertas, assim como da amplitude com que estas foram abertas, porém note-se que as janelas estavam também elas isoladas pelo interior com 10 cm de XPS, no laboratório leve.

Observando a Figura 5.28, apresentada abaixo, verifica-se que  $R_3$  assume valores muito baixos, pelo que quanto menor a resistência, maior a quantidade de ar que entra nos espaços. Ou seja, em todos os cenários apresentados houve necessidade de arrefecimento do espaço e este processo deu-se com a entrada de uma quantidade considerável de ar, à partida.

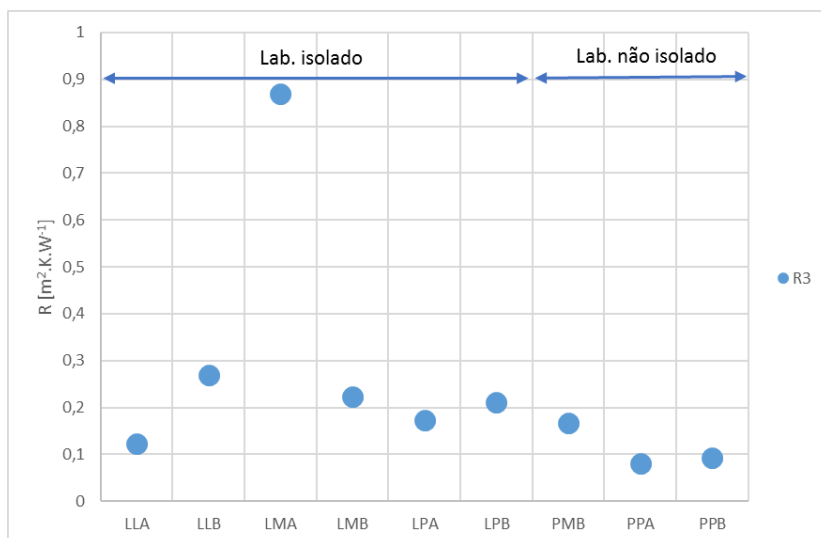


Figura 5.28 - Valores de  $R_3$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ) obtidos, pelo modelo 3R2C, para os cenários em que houve arrefecimento dos espaços.

### 5.3. Modelo 2R2C vs Modelo 3R2C

Neste trabalho foram testados dois modelos RC, 2R2C e 3R2C, para os mesmos cenários, pelo que neste capítulo se procede à comparação e análise dos resultados obtidos em ambos os modelos. Inicialmente são comparadas as condutâncias,  $C_1$  e  $C_2$ , depois as resistências,  $R_1$  e  $R_2$  e, por fim,  $q_{\text{vent}}$  e  $R_3$ , que apesar de terem unidades diferentes,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  respetivamente, traduzem o arrefecimento dos laboratórios, nos cenários em que isso acontece.

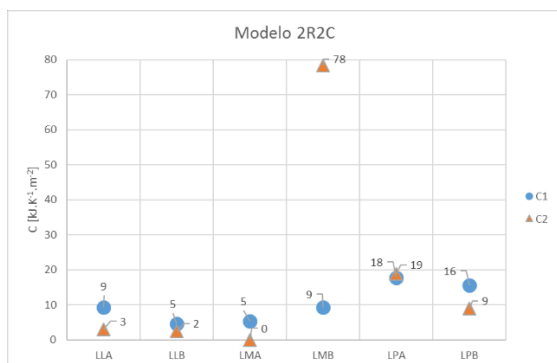


Figura 5.29 - Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório leve, a partir do modelo 2R2C.

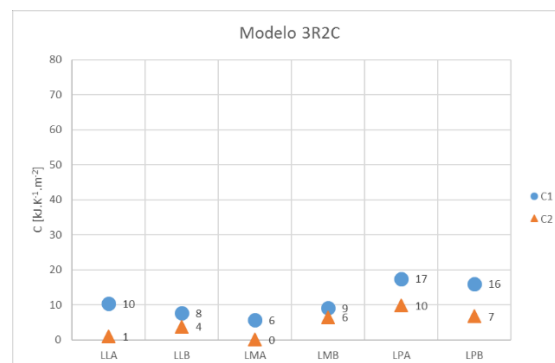


Figura 5.30 - Valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório leve, a partir do modelo 3R2C.

Pelas Figuras Figura 5.29 e Figura 5.30 verifica-se que os dois modelos são equivalentes no que refere às condutâncias obtidas para o laboratório leve, pois salvo uma exceção ( $C_2$  de LMB no modelo 2R2C) os valores encontram-se na mesma ordem de grandeza e são muito semelhantes.

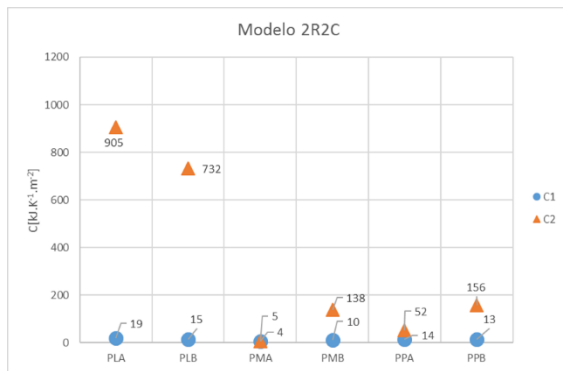


Figura 5.31 - Valores das capacidades  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório pesado, a partir do modelo 2R2C.

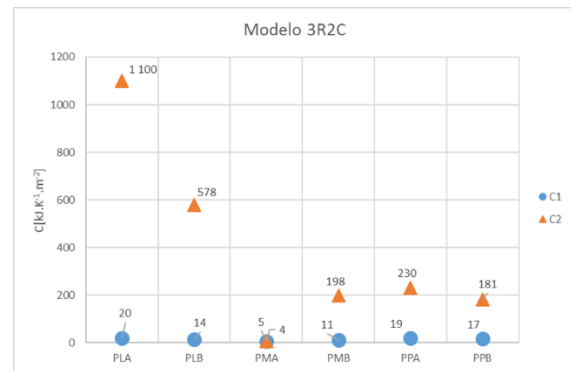


Figura 5.32 - Valores das capacidades  $C_1$  e  $C_2$  obtidos para os cenários do laboratório pesado, a partir do modelo 3R2C.

Observando agora as Figuras Figura 5.31 e Figura 5.32, é de notar um comportamento muito semelhante em ambos os gráficos, no que refere às condutâncias obtidas para o laboratório pesado. Mais uma vez, verifica-se que os valores obtidos a partir de cada um dos modelos são muito próximos.

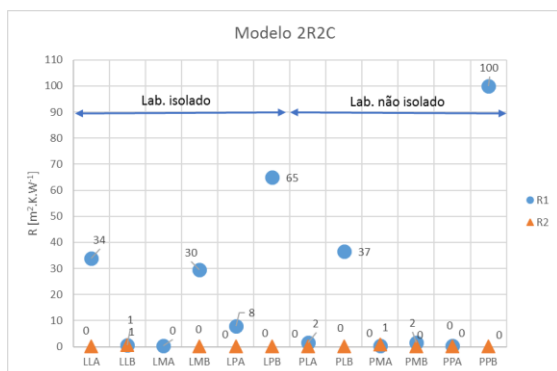


Figura 5.33 - Valores das resistências  $R_1$  e  $R_2$  obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 2R2C.

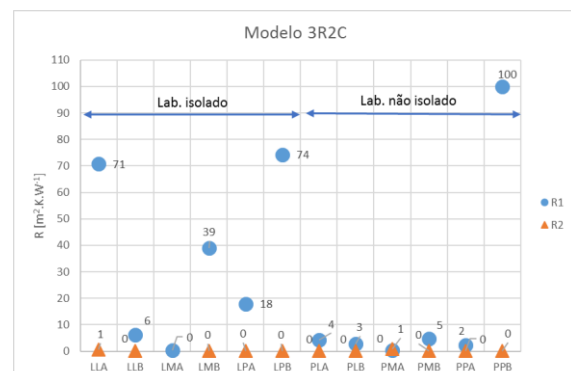


Figura 5.34 - Valores das resistências  $R_1$  e  $R_2$  obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 3R2C.

Pelas Figuras Figura 5.33 e Figura 5.34, é possível comparar as resistências  $R_1$  e  $R_2$  obtidas para cada um dos modelos. Deste modo, observa-se que  $R_2$  se mantém próxima de 0 e que  $R_1$  oscila consideravelmente, em ambos os casos. Ou seja, também neste caso os modelos são muito semelhantes.

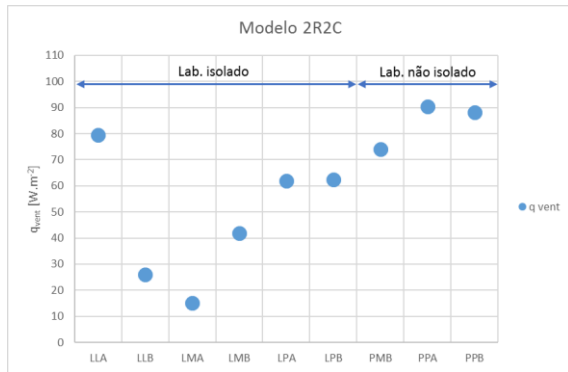


Figura 5.35 - Valores de  $q_{vent}$  obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 2R2C.

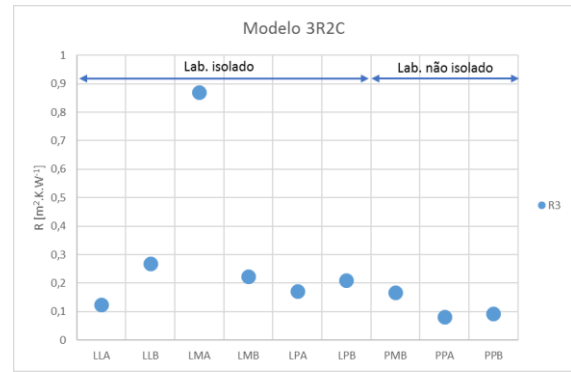


Figura 5.36 – Valores de  $R_3$  obtidos para todos os cenários, a partir do modelo 3R2C.

Um dos outputs do modelo 2R2C é a potência de ventilação ( $q_{vent}$ ) em W.m<sup>-2</sup>, que, pela Figura 5.35, se mostra crescente ao longo dos cenários. Por outro lado, na Figura 5.36 estão representados os valores de  $R_3$ , em m<sup>2</sup>.K.W<sup>-1</sup>, para os mesmos cenários, os que incluíram arrefecimento do espaço, sendo de notar que, de uma forma geral, existe uma ligeira tendência decrescente de  $R_3$  ao longo dos cenários. Desta forma, querendo relacionar os dois gráficos, pode dizer-se que  $R_3$  aumenta com a diminuição da entrada de ar, pelo que se este parâmetro decresce tendencialmente, significa que é cada vez maior a quantidade de ar que entra no espaço, o que vai ao encontro da potência de ventilação também crescente, representada na Figura 5.35.

## 5.4. Valores de referência

Os parâmetros obtidos com este estudo podem ser comparados com alguns valores de referência por forma a concluir sobre a fiabilidade, ou seja, sobre a precisão dos valores obtidos.

Na norma ISO 13790 encontram-se os valores de referência para diversas classes de inércia, neste caso são apresentados na Tabela 5.3 os valores de referência para inércia leve e pesada, classes utilizadas neste trabalho, correspondentes à constituição dos laboratórios, isto é, à capacitância  $C_2$  para o laboratório leve e pesado, respetivamente. Por outro lado, apresenta-se na Tabela 5.4 o valor de referência para a inércia térmica da mobília, presente na norma ISO 52016, com o qual são comparados os valores da capacitância  $C_1$  obtidos para todos os cenários e em ambos os modelos.

Tabela 5.3 – Valores de referência para  $C_2$  segundo [22].

Classe	Capacitância $C_2$ (kJ.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
Leve	110
Pesada	260



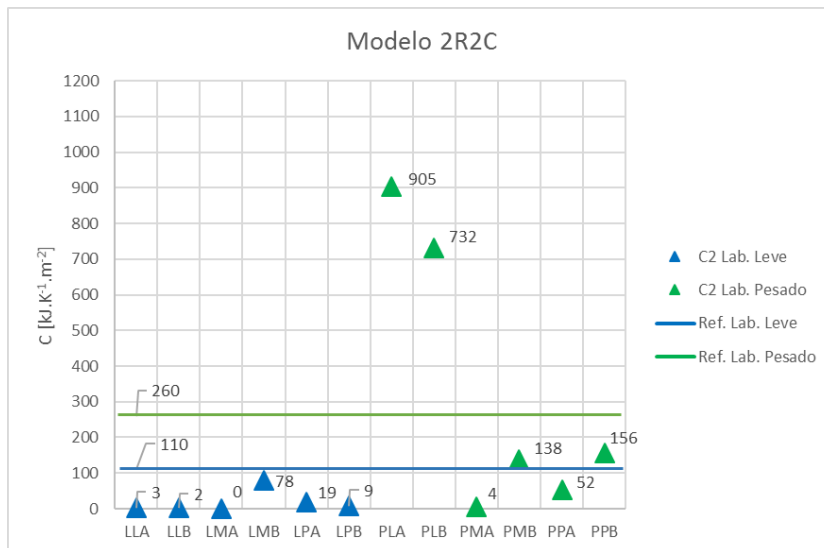


Figura 5.37 – Valores de  $C_2$  obtidos pelo modelo 2R2C para todos os cenários estudados, e valores de referência para inércia leve (laboratório leve a azul) e pesada (laboratório pesado a verde).

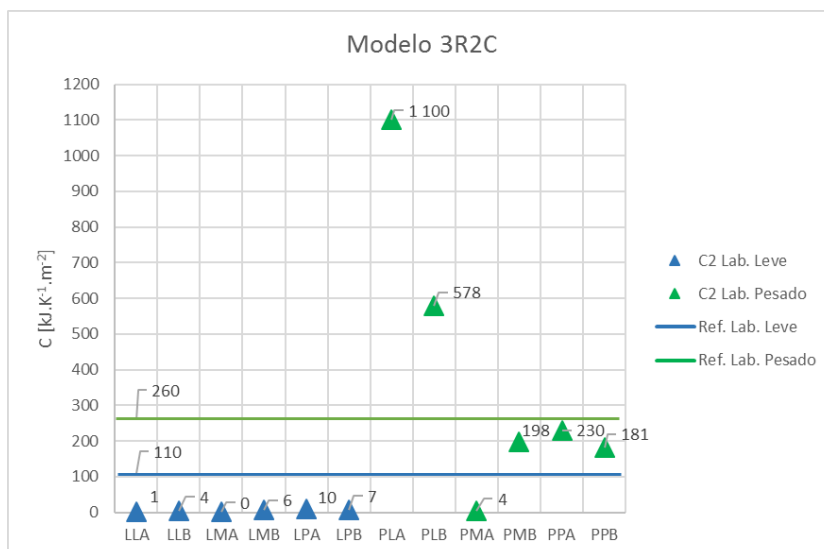


Figura 5.38 - Valores de  $C_2$  obtidos pelo modelo 3R2C para todos os cenários estudados, e valores de referência para inércia leve (laboratório leve a azul) e pesada (laboratório pesado a verde).

Observando as Figuras Figura 5.37 e Figura 5.38, relativas aos modelos 2R2C e 3R2C, respetivamente, pode concluir-se que, em ambas, os valores de  $C_2$  obtidos para o laboratório leve (a azul) se encontram numa ordem de grandeza abaixo do valor de referência ( $110 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ). Relativamente aos valores de  $C_2$  obtidos para o laboratório pesado, o comportamento é novamente idêntico para ambos os modelos, onde se observa que os valores são muito dispersos, variando de 4 a  $1100 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  ao passo que o valor de referência é de  $260 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ .

Tabela 5.4 – Valor de referência para  $C_1$  segundo [23].

Capacitância $C_1$ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
10

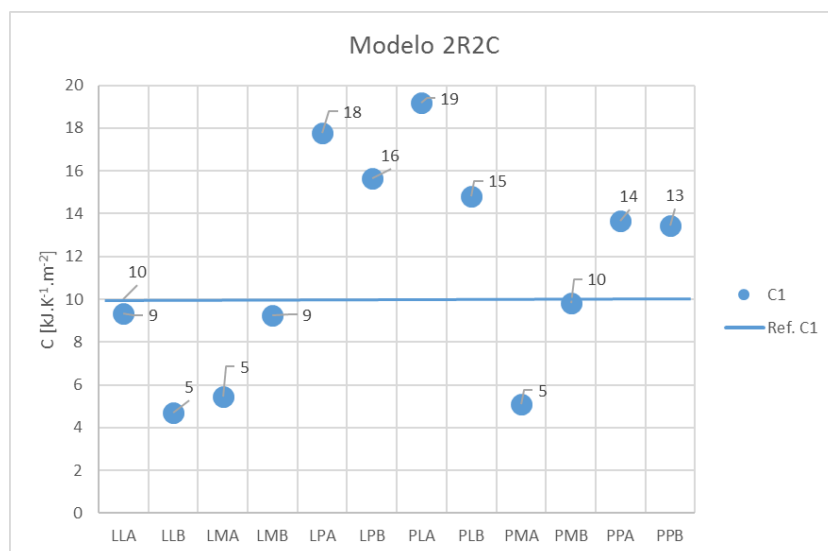


Figura 5.39 - Valores de  $C_1$  obtidos pelo modelo 2R2C para todos os cenários estudados, e valor de referência para  $C_1$  (móvel).

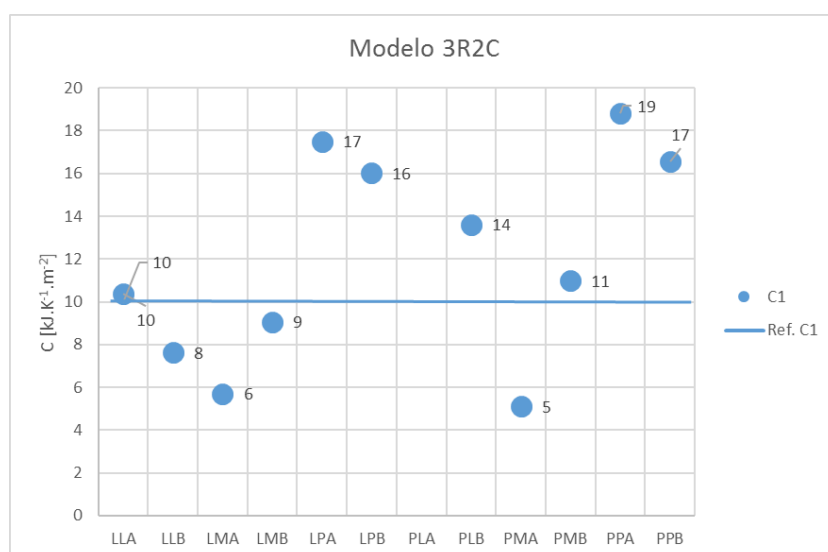


Figura 5.40 - Valores de  $C_1$  obtidos pelo modelo 3R2C para todos os cenários estudados, e valor de referência para  $C_1$  (móvel).

Nas Figuras Figura 5.39 e Figura 5.40 observa-se que os valores de  $C_1$  obtidos para ambos os modelos se encontram na mesma ordem de grandeza do valor de referência ( $10 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ), o que é um bom indicador da fiabilidade deste parâmetro.

## 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Neste trabalho, foram aplicados dois modelos RC, 2R2C e 3R2C, ao estudo da flexibilidade na procura de energia (*demand flexibility*) através do armazenamento térmico em edifícios de escritório, na estação de arrefecimento.

Os modelos foram aplicados com base em dados experimentais cedidos por alunos da FCUL e obtidos através de medições feitas em dois laboratórios do edifício C1 da FCUL em condições de ambiente de escritório com inércia leve, média e pesada.

Os edifícios ocupam um papel importante no sistema energético, pelo que este facto, aliado à crescente produção de energia renovável, conduz à necessidade de uma gestão segura e eficiente por parte da oferta e da procura de energia. Uma solução passa pela flexibilidade na procura de energia, daí a importância de se estudar os edifícios enquanto baterias térmicas, pois têm grande potencial na aproximação da curva da procura à curva da produção de energia. Não esquecendo que será sempre necessário haver um esforço por parte do consumidor na utilização das cargas dos edifícios, distribuindo-as ao longo do dia de forma favorável à rede.

Respondendo aos objetivos deste trabalho, foram obtidos diversos parâmetros com a aplicação dos modelos RC. Através destes parâmetros é possível concluir que os dois modelos acompanham de forma semelhante e razoável os dados experimentais, pelo que as observações referidas de seguida se referem a ambos os modelos.

Relativamente às capacidades os resultados sugerem que  $C_1$  não difere muito entre os laboratórios, tal como esperado, uma vez que este reflete a energia armazenada nos elementos existentes no interior dos laboratórios e não depende da composição dos mesmos, como é o caso de  $C_2$ . As capacidades  $C_1$  e  $C_2$ , de um modo geral, são muito próximas no laboratório leve, contudo no pesado,  $C_2$  é muito superior a  $C_1$ , como era expectável.

Em relação às resistências,  $R_1$  oscila consideravelmente ao longo dos cenários, contudo, seria de esperar que esta fosse superior no laboratório leve (isolado). De referir que  $R_1$  e, de um modo geral, superior a  $R_2$  e que  $R_2$  se mantém praticamente constante ao longo dos cenários, assumindo valores baixos, entre 0 e 2.

Os resultados referem ainda que  $R_3$ , uma resistência térmica de ventilação obtida a partir do modelo 2R2C, assume apenas valores entre 0 e 1, e que  $q_{\text{vent}}$ , parâmetro obtido a partir do modelo 3R2C, cresce tendencialmente ao longo dos cenários, de uma forma geral.

Por último, comparando os valores obtidos para as capacidades  $C_1$  e  $C_2$  com os valores de referência encontrados nas normas ISO 52016 e ISO 13790, respectivamente, pode concluir-se que  $C_1$ , que reflecte o efeito da mobília, se encontra na mesma ordem de grandeza do valor de referência ( $10 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ), para ambos os modelos.  $C_2$ , que está relacionada com a constituição dos laboratórios, para ambos os modelos, pode dizer-se que no laboratório leve esta capacidade apresenta valores abaixo do valor de referência ( $110 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ), já no laboratório pesado, dada a vasta gama de valores obtidos, que inclui o valor de referência ( $260 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ), torna-se inconclusivo.

Por forma a minimizar os erros associados às medições, seria interessante fazer mais medições para cada cenário, fazendo, por exemplo 3 dias de medições, em vez de apenas 1, aumentando a variabilidade das condições. Além disso, o arrefecimento dos laboratórios também poderá ser otimizado, controlando

melhor o processo ou substituindo a abertura e fecho das janelas pelo uso de AC. Fazer medições ao longo de 3 ciclos de aquecimento e arrefecimento irá melhorar a capacidade do programa na obtenção dos parâmetros RC, sendo também uma boa oportunidade de melhoria. Em trabalhos futuros será ainda interessante utilizar o modelo calibrado para estudar o armazenamento térmico em edifícios de escritório para outras condições (outros cenários de carga/descarga térmica) e concluir quanto aos resultados obtidos através de indicadores quantitativos (por exemplo, eficiência). A última sugestão passa pela avaliação do impacto da flexibilidade na procura de energia no contexto das Smart Grids/ gestão de energia.

## Referências Bibliográficas

- [1] H. Johra, *Aalborg Universitet Integration of a magnetocaloric heat pump in energy flexible buildings*, vol. 17. 2018.
- [2] M. C. C. Vargues, “Unlocking and understanding the demand flexibility in office buildings,” 2017.
- [3] Relatório anual da REN, “Eficiência Dinâmica,” 2018.
- [4] U. Degli *et al.*, “Experimental Study of Natural Ventilated Systems for Office Spaces,” 2018.
- [5] Joy Dalmacio Billanes, Zheng Ma, and Bo Nørregaard Jørgensen, “Consumer Central Energy Flexibility in Office Buildings,” *J. Energy Power Eng.*, vol. 11, no. 10, 2017.
- [6] United Nations Industrial Development Organization, “Sustainable Energy Regulation and Policy-Making for Africa,” *Management*, 2008.
- [7] I. Azevedo *et al.*, *Shift, Not Drift: Towards Active Demand Response and Beyond*, *Florence School of Regulation Think*. 2013.
- [8] M. F. Pichler, A. Heinz, and R. Rieberer, “Model predictive heat pump- and building control to maximize PV-power on-site use,” *12th IEA Heat Pump Conf. 2017*, 2017.
- [9] B. Initiatives, “Position Paper of the IEA Energy in Buildings and Communities Program (EBC) Annex 67 ‘Energy Flexible Buildings,’” no. November, pp. 1–16, 2017.
- [10] R. G. Junker *et al.*, “Characterizing the energy flexibility of buildings and districts,” *Appl. Energy*, vol. 225, pp. 175–182, 2018.
- [11] P. S. Kwon and P. Østergaard, “Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario,” *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 309–320, 2014.
- [12] H. Johra and P. Heiselberg, “Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. November 2016, pp. 19–32, 2017.
- [13] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, “Net zero energy buildings: A consistent definition framework,” *Energy Build.*, vol. 48, pp. 220–232, 2012.
- [14] M. J. N. Oliveira Panão, N. M. Mateus, and G. Carrilho da Graça, “Measured and modeled performance of internal mass as a thermal energy battery for energy flexible residential buildings,” *Appl. Energy*, no. January, pp. 252–267, 2019.
- [15] I. Kolev, K. Pavlova, and I. Kolev, “Energy flexibility of office buildings -Comparison on potential in different building types Master ’ s Thesis Report Authors :,” pp. 1–52, 2017.
- [16] H. Wolisz, T. M. Kull, R. Streblow, and D. Müller, “The effect of furniture and floor covering upon dynamic thermal building simulations,” *Energy Procedia*, vol. 78, no. November, pp. 2154–

2159, 2015.

- [17] S. Verbeke and A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. November 2016, pp. 2300–2318, 2018.
- [18] A. Reilly and O. Kinnane, "The impact of thermal mass on building energy consumption," *Appl. Energy*, vol. 198, no. January 2019, pp. 108–121, 2017.
- [19] J. P. Gouveia, J. Seixas, and A. Mestre, "Daily electricity consumption profiles from smart meters - Proxies of behavior for space heating and cooling," *Energy*, vol. 141, pp. 108–122, 2017.
- [20] D. D. E. E. Geográfica, G. E. Energia, M. Isabel, and D. Balsinha, "Comparação dos métodos RC para o cálculo horário das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento na EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1," 2015.
- [21] M. J. N. Oliveira Panão, C. A. P. Santos, N. M. Mateus, and G. Carrilho Da Graça, "Validation of a lumped RC model for thermal simulation of a double skin natural and mechanical ventilated test cell," *Energy Build.*, vol. 121, pp. 92–103, 2016.
- [22] EN ISO 13790. Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling, CEN, 2008.
- [23] EN ISO 52016. Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures. CEN, 2017.

## A. Anexos

### Modelo 2R2C

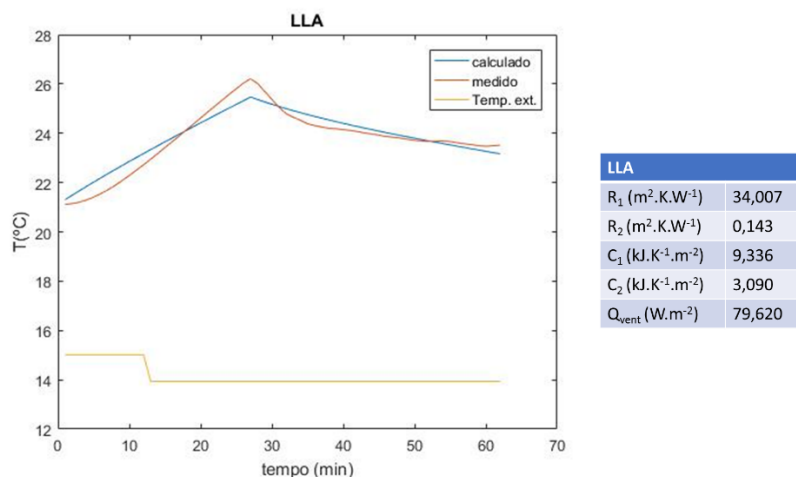


Figura A.1 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLA (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

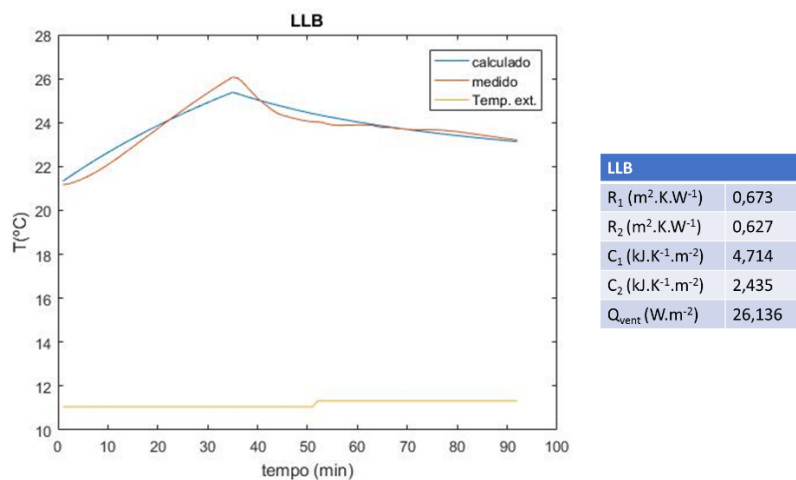


Figura A.2 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLB (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

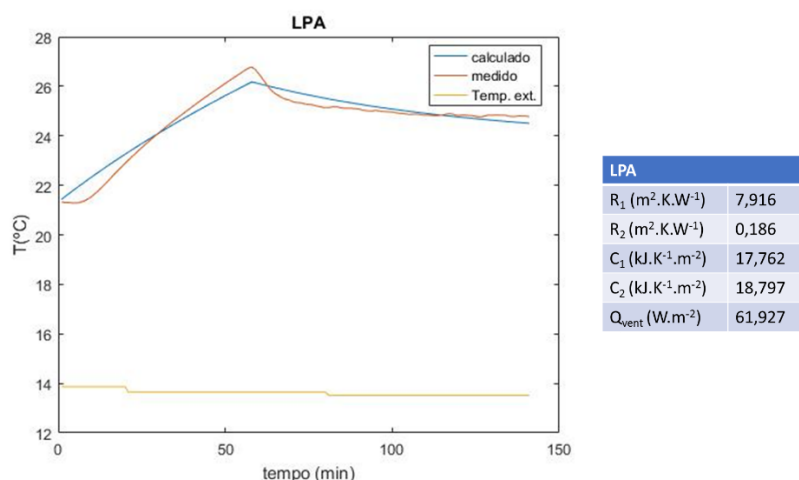


Figura A.3 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPA (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

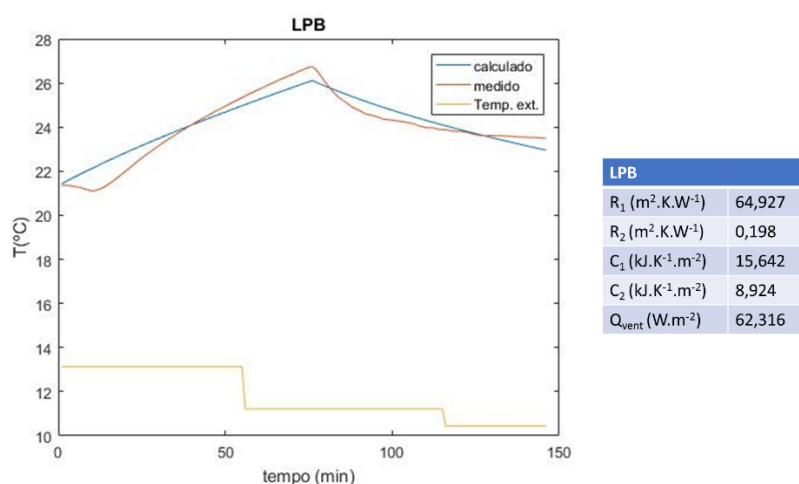


Figura A.4 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPB (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

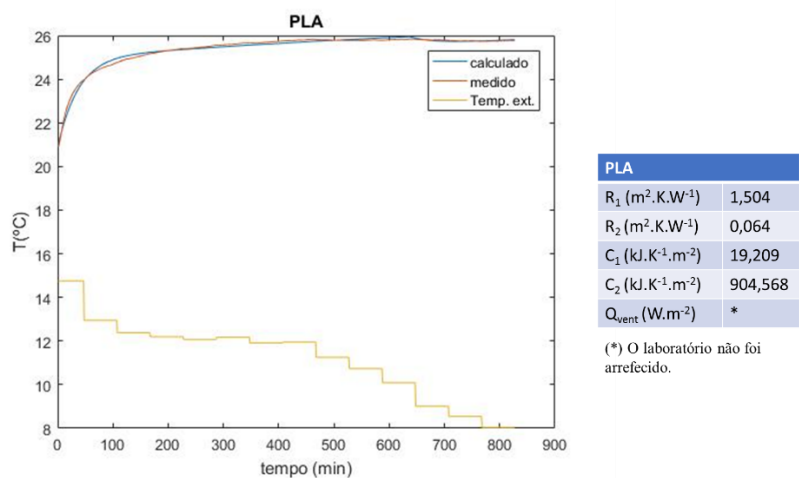


Figura A.5 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLA (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação. (\*) O laboratório não foi arrefecido



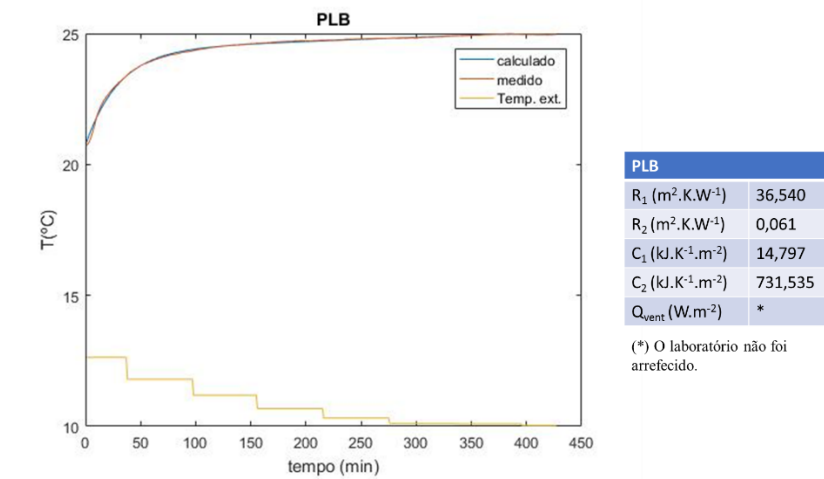


Figura A.6 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLB (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

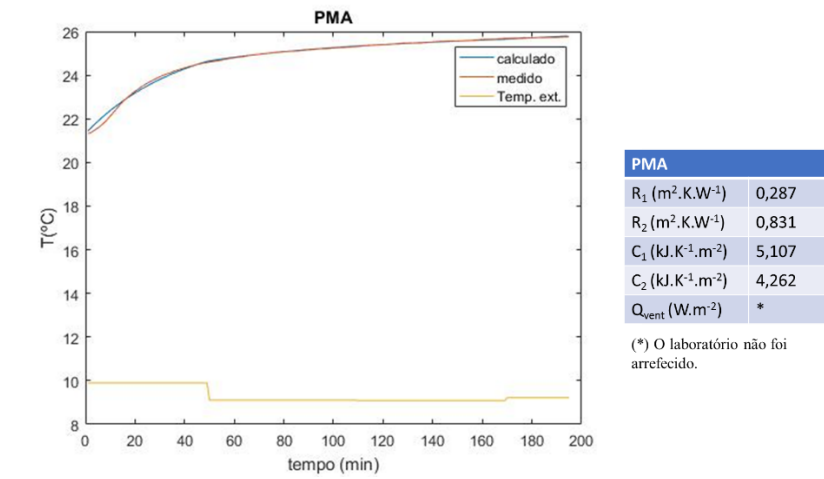


Figura A.7 - Resultado da modelação da temperatura (°C) em função do tempo (min), com o modelo 2R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMA (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

## Modelo 3R2C

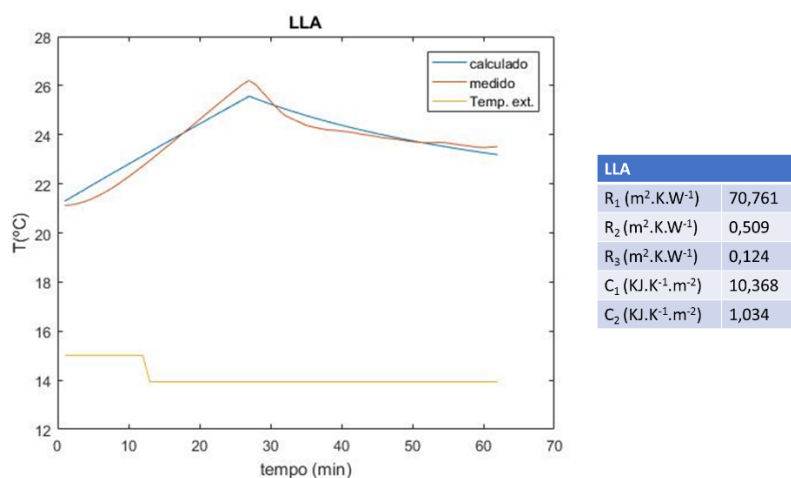


Figura A.8 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLA (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

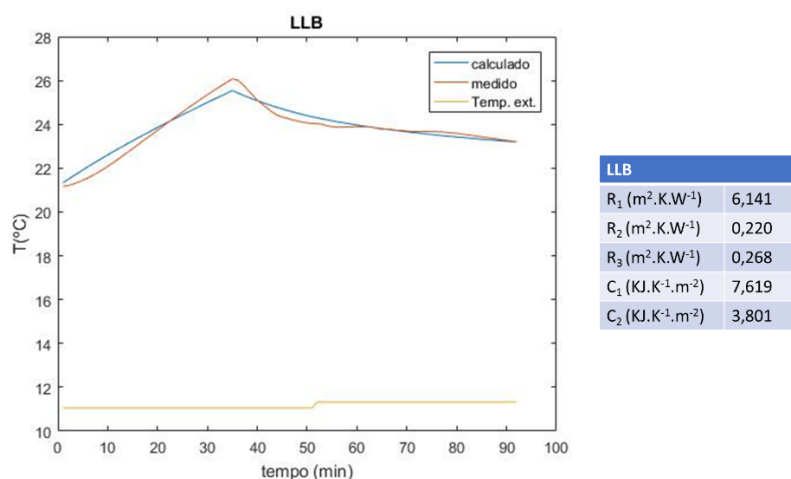


Figura A.9 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LLB (laboratório Leve, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

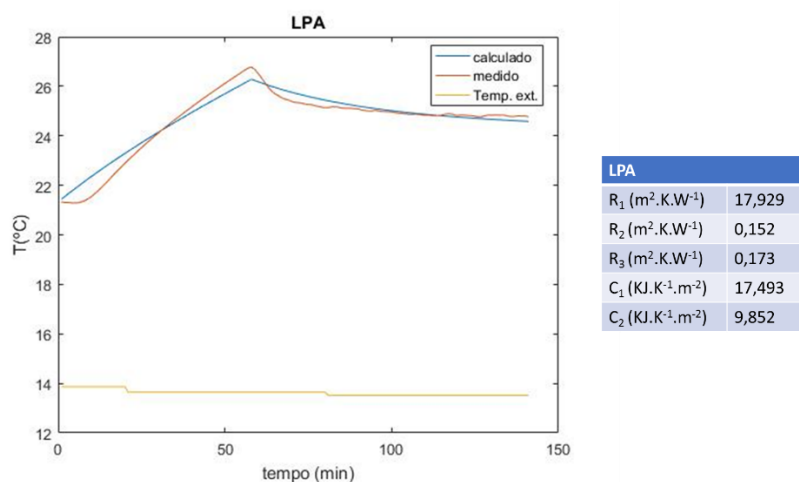


Figura A.10 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPA (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

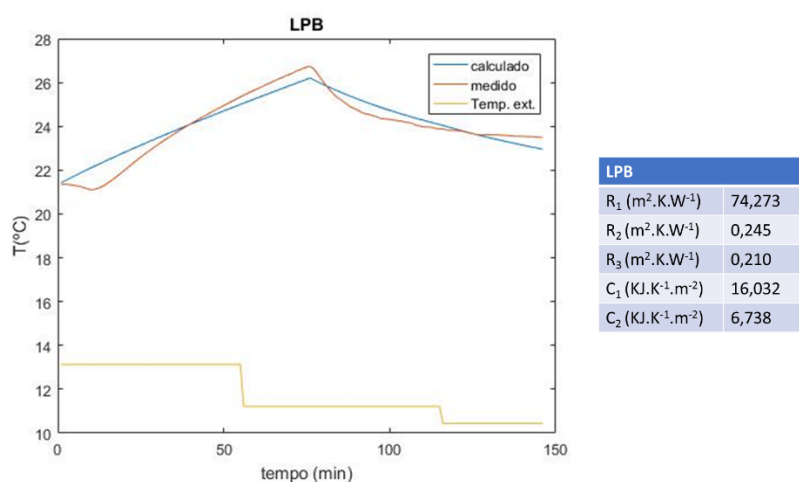


Figura A.11 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário LPB (laboratório Leve, mobília Pesada e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

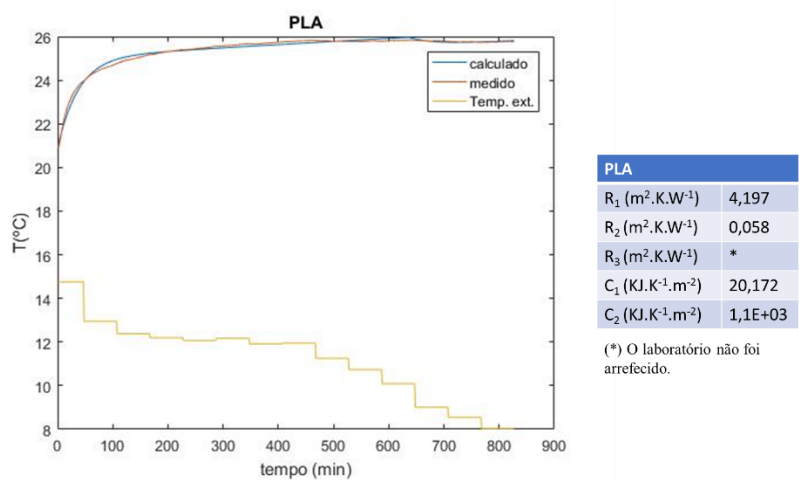


Figura A.12 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLA (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

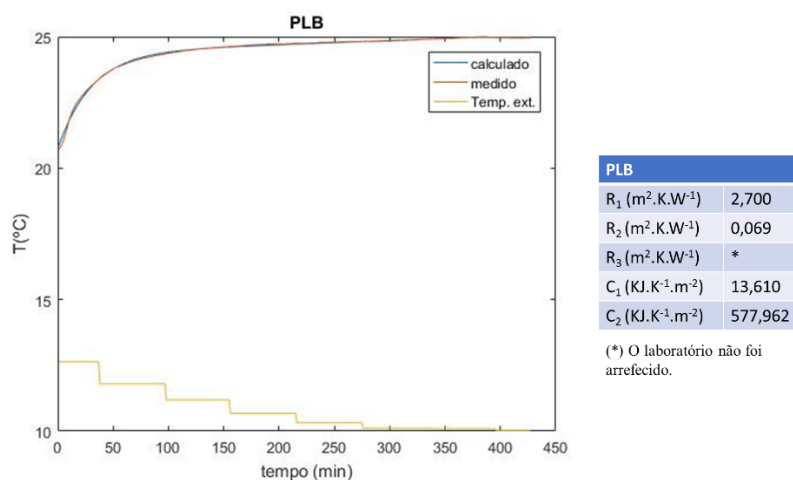


Figura A.13 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PLB (laboratório Pesado, mobília Leve e ganhos internos Baixos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.

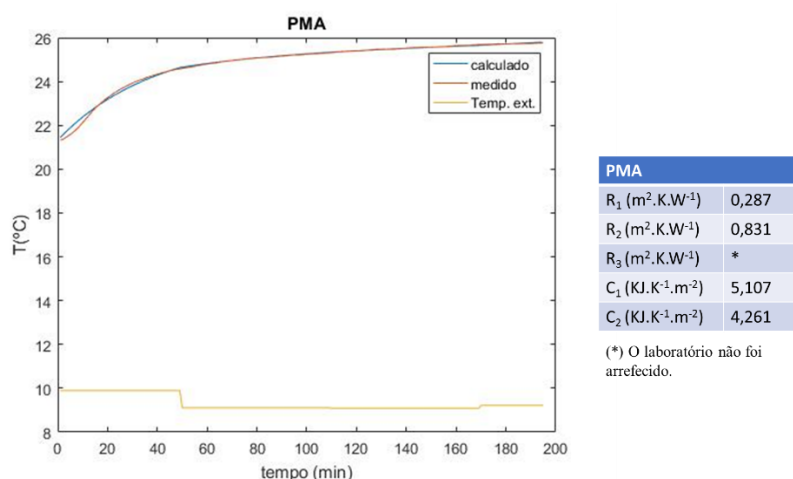


Figura A.14 - Resultado da modelação da temperatura ( $^{\circ}C$ ) em função do tempo (min), com o modelo 3R2C, comparado com os dados medidos para o cenário PMA (laboratório Pesado, mobília Média e ganhos internos Altos). À direita encontram-se os parâmetros obtidos com esta modelação.